

Peter Johannes Martin Weber

Primäre Kalibrierung von Ultraschall-Hydrophonen bis 100 MHz

Dissertation
Braunschweig 2019

**Primäre Kalibrierung von
Ultraschall-Hydrophonen bis
100 MHz**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigte Dissertation

von Peter Johannes Martin Weber

aus Passau

eingereicht am: 11.09.2018

Disputation am: 25.01.2019

1. Referent: Prof. Dr. M. Schilling

2. Referent: Prof. Dr. K. Jenderka

Druckjahr: 2019

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Vorwort

Diese Arbeit ist das Ergebnis von über vier Jahren meiner Forschung an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Durch die Kooperation zwischen der TU Braunschweig und der PTB, konnte ich an der „Braunschweig International Graduate School of Metrology“ (B-IGSM) teilnehmen. Die B-IGSM hat sich zur Aufgabe gemacht, Doktoranden in verschiedenen Fachrichtungen der Metrologie zusammenzubringen und die Vernetzung unter den Teilnehmern zu fördern.

An dieser Stelle möchte ich auch allen Mitmenschen danken, die ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Zunächst geht mein Dank an Herrn Prof. Dr. Schilling für die Bereitschaft diese Arbeit zu betreuen. Besonderer Dank geht auch an Herrn Dr. Koch und Herrn Dr. Wilkens, die die persönliche Betreuung der Arbeit vonseiten der PTB übernommen haben. Durch ihre Erfahrung und kritische Nachfragen haben sie mich bei dieser Arbeit immer unterstützt.

Besonders erwähnen möchte ich meine Kollegin und meine Kollegen aus der Arbeitsgruppe Ultraschall: Herrn Pätzold, Herrn Canaran, Herrn Brandt, Frau Walther und Herrn Reimann.

Frau Stederi hat ihr Forschungspraktikum bei mir durchgeführt und mich bei der Quadraturerweiterung für das Interferometer unterstützt.

Die Herrn Dr. Bieler und Herrn Struszewski von der Femtosekunden-Messtechnik standen mir bei der Charakterisierung der Fotodiode mit Rat und Tat zur Seite. Herr Dr. Winter, sowie seine Kollegen bei der Firma Polytec, konnten mir bei Fragen rund um das Vibrometer Auskunft geben.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Kollegen des Sprachendienstes der PTB für die Durchsicht der Journal- und Konferenzbeiträge.

Ganz lieben Dank auch an meine Eltern und an meine Ehefrau Wija, die mich immer motiviert und ermuntert haben, diese Arbeit zu Ende zu bringen.

Braunschweig, 29. März 2019

Abstract

Precise and comparable measurements became increasingly important in the linked world we live in. Therefore, in the year 1790 work was started on an international system of units to ensure the comparability of measurements, which finally resulted in the SI-system. All measurements are referred to the definition of the meter, the second, the ampere, the kelvin, the mol and the candela. This is also valid for derived quantities like the Pascal for the ultrasonic sound pressure in water.

The presented work reports the development of a setup for the primary calibration of hydrophones for the detection of ultrasound. Hydrophones are devices, that transfer the sound pressure into an electrical voltage. The ratio between the voltage and the sound pressure is called hydrophone sensitivity and this ratio is determined during calibration.

The first step of the calibration characterizes a sound pressure field in water by measuring the displacement of the water surface. A laser vibrometer is used for this task. The direct traceability to the meter is realized by the well-known wavelength of the laser. This measurement enables the precise characterization of the field of an ultrasonic transducer.

In the second step, the hydrophone is exposed to the known acoustical field and the hydrophone voltage is determined. The hydrophone sensitivity is determined from the results of both steps afterwards. For this calculation corrections and the uncertainty budget are determined, which are both subjects of this work.

To generate the ultrasonic field, an impulse procedure was used. It was used for the primary calibration for the first time. This procedure has the advantage, that the frequency range from 1 MHz to 100 MHz can be covered by one measurement and the hydrophone sensitivity can be evaluated in amplitude and phase. This fully characterizes the hydrophone sensitivity. It is a significant improvement compared to the former procedure of monofrequent burst excitation, which was used only up to 60 MHz and allows only the determination of the amplitude.

The calibration results can now be used, as it is shown as an example in this work, for the signal deconvolution of measurements, performed with the hydrophone, to reconstruct the original sound pressure. By this method, broadband signals acquired with hydrophones with a non-flat frequency response can be evaluated.

Zusammenfassung

In der vernetzten Welt, in der wir leben, ist es immer wichtiger geworden, genau und vergleichbar zu messen. Um die Vergleichbarkeit von Messungen zu gewährleisten, wurde daher seit 1790 an einem internationalen Einheitensystem gearbeitet, aus dem schließlich das SI-System hervorgegangen ist. Alle Messungen sind dazu auf die Definition des Meters, der Sekunde, des Ampere, des Kelvin, des Mol und der Candela zu beziehen. Dies gilt auch für davon abgeleitete Größen, wie das Pascal für den Ultraschallwechseldruck in Wasser.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Messplatzes für die Primärkalibrierung von Ultraschallhydrophonen. Hydrophone sind Geräte, die den Schalldruck in eine messbare Spannung umwandeln. Das Verhältnis zwischen der Spannung und dem Schalldruck ist die Hydrophonempfindlichkeit und dieses Verhältnis wird durch die Kalibrierung ermittelt.

Im ersten Schritt der Kalibrierung erfolgt die Bestimmung des Ultraschallwechseldruckes im Wasser durch die Messung der Auslenkung der Wasseroberfläche. Dazu wird ein Hochfrequenz-Laservibrometer eingesetzt. Über die Wellenlänge des Laserstrahls ist direkt der Bezug zu dem Meter gewährleistet.

Im zweiten Schritt der Kalibrierung wird das Hydrophon dem durch die Messung mit dem Vibrometer bekannten Schallfeld ausgesetzt und dabei seine Spannung gemessen. Aus den beiden Messungen wird die Hydrophonempfindlichkeit ermittelt. Dabei wurden auch Korrekturen für das Schallfeld berücksichtigt und das Unsicherheitsbudget wurde ermittelt.

Für die Erzeugung des Ultraschallsignals wird ein Impulsverfahren verwendet, das erstmals bei der Primärkalibrierung eingesetzt wird. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass der Frequenzbereich von 1 MHz bis 100 MHz durch eine einzige Messung abgedeckt wird und als Ergebnis sowohl die Amplitude als auch die Phase ermittelt wird. Dadurch ist das Übertragungsverhalten vollständig charakterisiert. Dies ist eine wesentliche Verbesserung zu den bisher für die Primärkalibrierung eingesetzten monofrequenten Bursts, die für die Kalibrierung bis 60 MHz genutzt wurden und nur die Bestimmung der Amplitude ermöglichten.

Die Daten der Kalibrierung können nun, wie an einem Beispiel gezeigt wird, dazu verwendet werden, um die mit dem Hydrophon gemessenen Signale zu entfalten und so den realen Schalldruckverlauf zu rekonstruieren. Dadurch lassen sich breitbandige Hydrophonsignale auswerten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abstract	III
Zusammenfassung	IV
1. Einleitung	1
1.1. Metrologie - Die Kunst des Messens	1
1.2. Primär-Standard für den Ultraschallwechseldruck	2
1.3. Zielsetzung der Arbeit	4
1.4. Gliederung der Arbeit	5
2. Physikalische und messtechnische Grundlagen	7
2.1. Ultraschall	7
2.2. Akustische Transmissions- und Reflexionskoeffizienten	8
2.3. Hydrophone	10
2.4. Messung der Hydrophonspannung	11
2.5. Signale für die Burstanregung	12
2.6. Impulsanregung	13
2.7. Fourier-Transformation	15
2.8. Interferometrie	17
2.9. Vibrometer - Heterodyne Interferometrie	20
2.10. Gauß-Strahl, Gouy-Phase und deren Einfluss auf die Messung . .	22
2.11. Unsicherheitsbetrachtung für komplexwertige Größen	23
3. Kalibrierung von Hydrophonen unter Verwendung des Vibrometers	25
3.1. Messung mit dem Vibrometer	28
3.2. Messung der Hydrophonspannung	29
3.3. Vibrometer	31
3.4. Ultraschallsignalerzeugung	31
3.4.1. Ultraschallwandler für die Impulsanregung	32
3.4.2. Ultraschallwandler für die Burstanregung	33

3.5. Mechanik	35
3.6. Folie und Folienhalterung	36
3.7. Hydrophonhalterung	37
3.8. 3D-gedruckte Halterung	38
3.9. Temperierung des Wassers	39
3.10. Chemische und physikalische Eigenschaften des Wassers	42
3.11. Bestimmung von elektrischen Impedanzen	42
3.12. Software	43
3.12.1. Messdatenerfassung	43
3.12.2. Auswertung der Ergebnisse	43
4. Korrekturgrößen und Unsicherheitsbudget für den Messaufbau	47
4.1. Frequenzgang der Fotodiode	49
4.1.1. Bestimmung des Fotodiodenfrequenzgangs	50
4.1.2. Simulation der Abweichung für einen Ultraschallimpuls	52
4.2. Einfluss des Mikroskopobjektivs	55
4.3. Einfluss des Rauschens bei der Messung mit dem Vibrometer	55
4.4. Einfluss des Rauschens bei der Ermittlung der Hydrophonspannung	58
4.5. Berechnung der Folienkorrektur	59
4.6. Verifizierung der Folienkorrektur	61
4.7. Räumliche Mittelung für die Impulsanregung	63
4.8. Bestimmung der räumlichen Mittelung für die Burstanregung	69
4.9. Abstandsabhängigkeit der Schallfeldwirkung am Messpunkt	69
4.10. Temperaturabhängigkeit und Reproduzierbarkeit des Schallfeldes	71
4.11. Spannungsmessung des Hydrophons mit dem Oszilloskop	73
4.12. Hydrophonvorverstärker und Lastkorrektur	74
4.12.1. Hydrophonsysteme mit eingebautem Verstärker	75
4.12.2. Verwendung eines externen Verstärkers	75
4.12.3. Messung der Hydrophonspannung mit dem Oszilloskop	75
4.13. Modellgleichung und Unsicherheitsbetrachtung	76
5. Erweiterung des Interferometers auf Quadraturdetektion	79
5.1. Aufbau und Funktionsweise	79
5.2. Auswertung der Quadratursignale	82
5.3. Unsicherheitsbetrachtung	84
5.3.1. Modellgleichung	84

5.3.2. Berechnung	87
6. Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit von Membranhydrophonen	89
6.1. Hydrophon IP037	89
6.1.1. Impulsanregung und Messung mit dem Vibrometer	90
6.1.2. Burstanregung und Messung mit dem Vibrometer	91
6.1.3. Erstellen eines Referenzfits	94
6.2. Hydrophon IP038	97
6.2.1. Kalibrierung des Hydrophons mit dem Vibrometer	97
6.2.2. Vergleich zwischen IP038 relativ zu IP037 am TDS-Messplatz	97
6.3. Hydrophon BB01	99
6.4. Hydrophon HITU-SI-03	101
7. Anwendung der Kalibrierdaten für die Impulsentfaltung	105
7.1. Messung eines HITU-Burst mit einem HITU-Hydrophon	106
7.2. Regularisierungsfilter	108
7.3. Unsicherheitsbetrachtung	109
8. Zusammenfassung und Ausblick	111
A. Unsicherheitsabschätzung von radialen Verschiebungen	121
B. Software zur Messdatenerfassung	123
B.1. Benutzeroberfläche	124
C. Software zur Messdatenauswertung	127
D. Software zur Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit	131
E. Veröffentlichungen	133

1. Einleitung

Technischer Fortschritt und die Verfeinerung der Messtechnik haben sich wechselseitig in einer Entwicklungsspirale stetig verbessert. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht absehbar. Als Einleitung wird die Geschichte der Metrologie kurz angerissen und anschließend in das Thema der Arbeit eingeführt.

1.1. Metrologie - Die Kunst des Messens

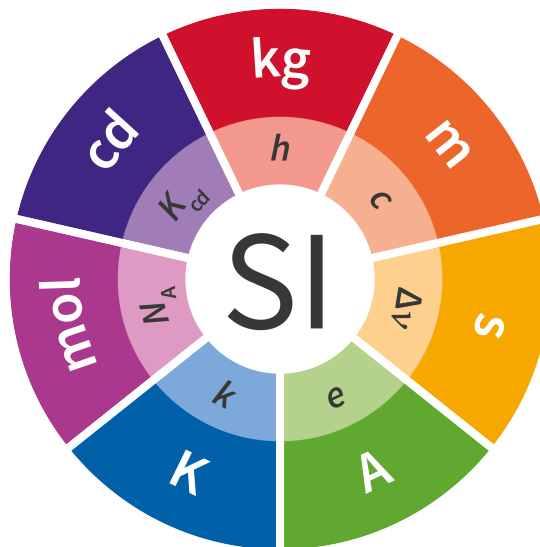


Abbildung 1.1.: Symbolbild für das neue SI-System mit den sieben Basiseinheiten und ihren definierenden Naturkonstanten. Abbildung: BIPM, Lizenz: CC BY-ND 4.0 <https://www.bipm.org/en/si-download-area/graphics-files.html>

Die Geschichte des Messens ist wahrscheinlich genauso alt wie die Geschichte der Menschheit. Bereits seit Jahrtausenden vermisst der Mensch seine Umwelt. Angefangen mit der Landvermessung im alten Ägypten, über die Kartografierung der Welt und der damit einhergehenden Definition des Urmeters, hin zu der

Definition des Meters, zunächst über die Wellenlänge eines optischen Übergangs des Kryptons und anschließend über die Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit. Bei jedem der zahlreichen Entwicklungsschritte war steter Antrieb die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen und über immer abstraktere Definitionen die Unabhängigkeit der Definition von veränderlichen Artefakten zu erreichen. Gleichzeitig hat auch jede Verbesserung in der Messtechnik den Weg für die immer genauere Untersuchung der Natur bereitet, wodurch neue Erkenntnisse erlangt wurden.

Heutzutage beziehen sich alle physikalischen Größen auf das Internationale Einheitensystem (SI-System [1]) mit seinen 7 Basiseinheiten. Mit der 2019 kommenden Neudefinition des SI-Systems werden erstmals alle Einheiten, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, über Naturkonstanten definiert [2]. Das SI-System bildet die Grundlage, auf welche sich alle Messungen beziehen sollen. Die Aufgabe nationaler Metrologieinstitute ist es, diese Größen darzustellen und weiterzugeben, die Messtechnik immer weiter zu verbessern und für möglichst viele physikalische Größen Normale bereitzuhalten.

Alle abgeleiteten Größen, wie der Druck mit der Einheit Pascal, lassen sich durch Kombination der SI Basiseinheiten darstellen, in diesem Fall also $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg}/(\text{m s}^2)$. Dementsprechend muss es für jede Größe auch eine messtechnische Realisierung geben, mit der diese Größe auf die Größen des SI-Systems zurückgeführt werden kann, also hierbei auf Länge, Masse und Zeit.

1.2. Primär-Standard für den Ultraschallwechseldruck

Die vorliegende Arbeit behandelt die Darstellung der Einheit Pascal für den Ultraschallwechseldruck in Wasser und deren Weitergabe durch die Kalibrierung von Hydrophonen. Eine Ultraschallwelle in Wasser ist eine Druckvariation in Raum und Zeit. Sie besitzt, wie auch eine Schallwelle in Luft, einen Schalldruck. Mit dem Schalldruck verknüpft ist die Auslenkung des Mediums Wasser. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein entsprechender Primärmessplatz realisiert, mit dem der Schalldruck auf die Basisgrößen zurückgeführt wird. Die Hauptanwendung dieses Messplatzes ist die Kalibrierung von Hydrophonen. Hydrophone sind Messinstrumente, die den Schalldruck in eine andere physikalische Größe, meist eine elektrische Spannung, umwandeln, die dann gemessen werden kann. Sie dienen zur Messung von Ultraschallsignalen und werden kalibriert,

indem das Verhältnis von elektrischer Spannung zu Schalldruck bestimmt wird. Hauptinteressenten für die Kalibrierung von Hydrophonen sind Medizintechnikhersteller, die mit den Hydrophonen den Schalldruck ihre Ultraschallgeräte charakterisieren können und ihre Messungen dabei über den Kalibrierschein und die Rückführungskette auf das SI-System beziehen können. Dieser Schritt ist für die Hersteller entscheidend, da sie nur so die Richtigkeit ihrer Messung nachweisen können, um die gesetzlichen Anforderungen für Medizinprodukte erfüllen zu können.

Es gibt weltweit bereits mehrere Primärmessplätze für den Ultraschallwechseldruck, die unterschiedliche Strategien verfolgen. Allen gemeinsam ist, dass sie ein Laserinterferometer verwenden, um die Auslenkung des Wassers, hervorgerufen durch eine Ultraschallwelle, zu vermessen. Durch die sehr genau bekannte Wellenlänge des Lasers ist bei der Messung der Bezug zu dem Meter hergestellt.

Eine verspiegelte Folie, die der Auslenkung des Wassers folgt, sorgt dafür, dass der Laserstrahl an einem definierten Ort, an welchem die Auslenkung gemessen werden soll, mit ausreichender Intensität reflektiert wird. Der Primärmessplatz des National Physical Laboratory (NPL) in England ist dabei so aufgebaut, dass sich die Folie vollständig innerhalb des Wassers befindet [3, 4, 5, 6]. Sie kann dabei unmittelbar der Wasserteilchenbewegung folgen. Allerdings durchquert bei dieser Anordnung der Laserstrahl das Wasser und das Ultraschallfeld, so dass Korrekturen für den Brechungsindex und den akustooptischen Effekt notwendig sind.

Bei dem Messplatz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt liegt die Folie horizontal auf der Wasseroberfläche auf [7]. Dadurch ist das Ultraschallfeld, welches sich in dem Wasser ausbreitet, von dem Laserstrahl, der sich nur in der Luft befindet, getrennt. In Folge dessen sind keine Korrekturen für den Brechungsindex und den akustooptischen Effekt notwendig. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Ultraschallwelle an der Grenzfläche zur Luft nahezu vollständig reflektiert wird. Dadurch wird die Auslenkung der Folienoberfläche doppelt so groß, im Vergleich zu der Teilchenauslenkung innerhalb des Wassers.

Für die Erzeugung der Ultraschallsignale wird in beiden Messständen ein monofrequenter Sinusburst mit einer Schalldruckamplitude von einigen 100 kPa verwendet. Um den Frequenzgang des Hydrophons zu charakterisieren, müssen Messungen bei verschiedenen Frequenzen nacheinander durchgeführt werden. Die Nachteile dieser Anregungsart sind, dass die erzeugbaren Ultraschallfrequenzen durch die Bandbreite des Ultraschallwandlers begrenzt sind und dass der

Phasengang des Hydrophons aufgrund der separaten Messungen nicht direkt bestimmt werden kann. Die simultane Erzeugung von Ultraschallfrequenzen für die gleichzeitige Messung bei verschiedenen Frequenzen hat das NPL zunächst dadurch gelöst, dass die Amplitude des Schalldrucks erhöht wurde [8]. Ab einem Schalldruck von etwa 1 MPa verhält sich das Wasser bei der Ausbreitung von Ultraschallwellen nichtlinear. Daraus resultiert, dass bei einem Sinus-Burstsignal während der Ausbreitung in Wasser höhere harmonische Frequenzen mit fester Phasenbeziehung entstehen, die für die Untersuchung herangezogen werden.

Weitere Primärnormale betreibt das nationale Metrologieinstitut von Japan (NMIJ). Es verwendet einen vergleichbaren Aufbau wie das NPL für Kalibrierung von Hydrophonen [3, 9, 10, 11], bei dem ebenfalls eine vollständig in das Wasser eingetauchte Folie zum Einsatz kommt.

Das nationale Metrologieinstitut von China (NIM) ist ebenfalls im Aufbau eines Messplatzes für die Hydrophonkalibrierung [12]. Dieser verwendet ein Laservibrometer zur Messung der Auslenkung der Folie.

1.3. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Metrologie für den Ultraschalldruck weiterzuentwickeln. Dabei geht es um die Darstellung und Weitergabe der Einheit Pascal für den Ultraschallwechseldruck in Wasser. Dazu wurde ein neuartiger Messplatz aufgebaut, charakterisiert und das Messverfahren weiterentwickelt. Anstelle des bisherigen Laserinterferometers tritt ein kommerzielles Hochfrequenzvibrometer. Das Vibrometer kann im Frequenzbereich von 0,1 MHz bis 600 MHz Schwingungen mit geringen Messunsicherheiten bestimmen. Es ist in der Lage, Ultraschallsignale mit einem Schalldruck von mehreren Megapascal zu charakterisieren. Für die Erzeugung der Ultraschallsignale wird neben den Sinusbursts auch ein Impulsanregungsverfahren angewendet, das bereits an einem Sekundärmessplatz zuverlässig eingesetzt wurde. Die Impulsanregung erzeugt ein breitbandiges Ultraschallsignal mit dem die Kalibrierung von Hydrophonen im Bereich von 1 bis 100 MHz möglich ist. Da in dem breitbandigen Signal auch die Phaseninformation enthalten ist, kann nun erstmals der Frequenzgang des Hydrophons in Amplitude und Phase gleichzeitig charakterisiert werden. Das Unsicherheitsbudget wurde unter Verwendung des GUM für den Fall komplex-

wertiger Größen erstellt. Darüber hinaus wurde der Messplatz weitestgehend automatisiert, so dass zukünftig eine wirtschaftliche Bearbeitung von Kalibrier-
aufträgen möglich ist.

Um auch die praktische Anwendung der nun als komplexwertige Größe vorliegenden Hydrophonempfindlichkeit zu demonstrieren, wurden diese Daten der Hydrophonkalibrierung für die Impulsentfaltung angewendet. Die Idee der Impulsentfaltung ist dabei folgende: Bei der Messung des Schalldrucks mit einem Hydrophon wird das Ultraschallsignal durch den Frequenzgang verzerrt. Mathematisch lässt sich dies als Faltung des Ultraschallsignals mit der Impulsantwort des Hydrophons beschreiben. Das Ziel bei der Entfaltung ist es, diesen Prozess rückgängig zu machen und so aus dem elektrischen Hydrophonsignal das ursprüngliche Ultraschallsignal zu rekonstruieren. Darüber hinaus wurde das Interferometer des bisherigen Primärmessplatzes mit neuen Fotodioden ausgerüstet, um auch mit diesem System Impulse großer Amplitude für die Ultraschallsignalerzeugung verwenden zu können.

1.4. Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte. In Kapitel 2 wird zunächst eine knappe Zusammenfassung der wesentlichen physikalischen und messtechnischen Grundlagen gegeben. Anschließend, in Kapitel 3, wird der neu aufgebaute Messplatz beschrieben, bei dem ein Hochfrequenzvibrometer zum Einsatz kommt. Kapitel 4 widmet sich den zu berücksichtigenden Korrekturgrößen und der Unsicherheitsbetrachtung des Messstandes. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Überarbeitung und Erweiterung des vorhandenen Interferometers und der Realisierung der Quadraturdetektion. In Kapitel 6 werden anschließend die Kalibrierergebnisse verschiedener Hydrophone präsentiert und mit historischen Daten verglichen. Kapitel 7 zeigt anschließend wie die Daten der Hydrophonkalibrierung, insbesondere die Daten, die mit dem neuen Messstand gewonnen wurden, für die Impulsentfaltung von Messdaten eingesetzt werden können. Diese Anwendung ist insbesondere für die Auswertung von Ultraschallmessungen bei hohen Intensitäten von Interesse. Das 8. und letzte Kapitel fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick.

2. Physikalische und messtechnische Grundlagen

Zunächst wird ein Überblick über die physikalischen Grundlagen gegeben, die für das Verständnis dieser Dissertation notwendig sind. Diese werden im Folgenden in komprimierter Form zusammengefasst. Für detailliertere und weitergehenden Darstellungen sei auf die angegebene Literatur verwiesen.

2.1. Ultraschall

Ultraschall ist eine mechanische Welle, die sich in einem Medium, im Kontext dieser Arbeit ist das Wasser, in Form einer Longitudinalwelle ausbreitet. Während der Ausbreitung der Ultraschallwelle wird ein Volumenelement des Mediums, das im Folgenden als Teilchen bezeichnet wird, im Zeitverlauf sowohl ausgelenkt als auch einem Druck ausgesetzt [13, 14]. Durch zeitliche Differenziation der Auslenkung ergibt sich die Teilchengeschwindigkeit und durch erneute Differenziation die Teilchenbeschleunigung.

Die Dynamik der Bewegung lässt sich durch die Euler-Gleichung beschreiben. Dabei ist ρ die Dichte des Mediums Wasser, \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor, P der Druck und $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla P \quad (2.1)$$

Zum Lösen der Differenzialgleichung ist es hilfreich das Geschwindigkeitspotential Φ einzuführen. Für das Potential gelten folgende Gleichungen:

$$\vec{v} = -\nabla \Phi, P = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \rho = -\frac{\rho_0}{c_0^2} \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \vec{\xi} = \int \vec{v} dt = \int -\nabla \Phi dt \quad (2.2)$$

Damit lässt sich die Wellengleichung umschreiben nach:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Eine Lösung der Differenzialgleichung ist eine ebene Welle, die im Folgenden beschrieben wird. Für eine ebene Welle, die sich in z -Richtung ausbreitet, ist das Geschwindigkeitspotential unabhängig von x - und y -Koordinate. ($\Phi(x, y, z) = \Phi(z)$)

Damit ergibt sich als allgemeine Lösung der Gleichung

$$\Phi = f\left(t \pm \frac{z}{c_0}\right). \quad (2.4)$$

Für harmonische Wellen lässt sich die Lösung schreiben als

$$\Phi = \Phi_m \exp(2\pi i f(t \mp z/c_0)) \quad (2.5)$$

wobei Φ_m die Amplitude des Geschwindigkeitspotentials ist.

Für die Messung wird das Schallfeld eines fokussierenden Ultraschallwandlers verwendet. Sein Schallfeld entspricht damit nicht einer ebenen Welle. Für die Vibrometermessung wird das laterale Maximum des Schallfeldes senkrecht zu der Schallausbreitungsrichtung (z -Achse) verwendet. Für das Maximum gilt die Bedingung $\partial P/\partial x = \partial P/\partial y = 0$. Somit ist die Näherung für die ebene Welle weiterhin gültig.

2.2. Akustische Transmissions- und Reflexionskoeffizienten

Trifft eine Ultraschallwelle auf eine ebene Grenzfläche zwischen zweier Medien, so wird, wie auch in der Optik, ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil transmittiert [14, 15, 16]. Die Ausbreitungseigenschaften im Medium werden durch die akustische Impedanz $Z = \rho c$ beschrieben. Dabei ist ρ die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit in dem Medium.

Bei senkrechtem Einfall einer Ultraschallwelle, die sich in dem Medium mit einer Impedanz von Z_i ausbreitet und auf die Grenzfläche zu einem Medium mit der Impedanz Z_j trifft, berechnet sich der Reflexionskoeffizient für die Teilchenverschiebung zu [17]

$$R_{i,j} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_i + Z_j} \quad (2.6)$$

und der Transmissionskoeffizient zu

$$T_{i,j} = \frac{2Z_i}{Z_i + Z_j} = 1 + R_{i,j}. \quad (2.7)$$

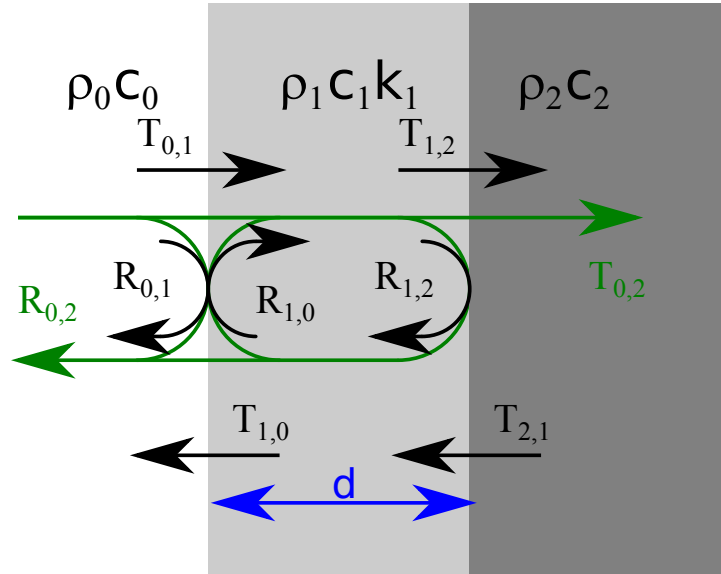


Abbildung 2.1.: Skizze für die Reflexion an mehreren Schichten. Die Bezeichnungen sind im Text erläutert.

An der Grenzschicht zwischen Wasser ($Z_W \approx 1,4 \cdot 10^6 \text{ N s/m}^3$) und Luft ($Z_L \approx 414 \text{ N s/m}^3$) wird die Ultraschallwelle nahezu vollständig reflektiert. Es handelt sich um die Reflexion an einem akustisch weicheren Medium. Die Auslenkung der Wasseroberfläche ist dabei doppelt so groß wie die Partikelauslenkung im Medium, was durch den Wert des Transmissionskoeffizienten $T \approx 2$ beschrieben wird. Dieser Effekt ist analog zur Reflexion von Spannungsimpulsen an offenen Kabelenden.

Befindet sich auf der Wasseroberfläche eine Folie, so sind auch deren Eigenschaften zu berücksichtigen. An der dünnen Folie interferieren die mehrfach reflektierten Wellen. Daher besitzt die Folie für Ultraschallwellen ein frequenzabhängiges Transmissionsverhalten [7]. Für ein System bestehend aus aufeinanderfolgenden Medien, wie in Abbildung 2.1 skizziert, bezeichnet mit den Indizes 0,1,2, lässt sich der Transmissionskoeffizient durch folgenden Gleichung beschreiben [17, 18]:

$$T_{0,2} = \frac{T_{0,1} T_{1,2} \exp(ik_1 d_1)}{1 - R_{1,0} R_{1,2} \exp(ik_1 2d_1)} \quad (2.8)$$

d_1 ist die Dicke und k_1 die Wellenzahl des Mediums 1. Der Reflexionskoeffizient lautet:

$$R_{0,2} = R_{0,1} + \frac{T_{0,1} R_{1,2} T_{1,0} \exp(ik_1 2d_1)}{1 - R_{1,0} R_{1,2} \exp(ik_1 2d_1)} \quad (2.9)$$

Die Gleichungen für eine aus der Gegenrichtung einfallende Welle ergeben sich durch Vertauschen der Indizes 0 und 2. Für ein System bestehend aus mehreren Schichten (Wasser, Folie, Aluminium, Luft) lässt sich die Lösung iterativ bestimmen.

2.3. Hydrophone

Hydrophone sind sensitiv auf den Ultraschallwechseldruck in Wasser. Die in dieser Arbeit untersuchten Membranhydrophone verwenden eine piezoelektrische Polyvinylidenfluorid (PVDF) Folie. Sie wandeln das Drucksignal p in ein elektrisches Spannungssignal U um¹. Ihr Übertragungsverhalten zeigt dabei einen Frequenzgang (Amplitude und Phase). Das Verhältnis zwischen Spannung und Schalldruck wird als Hydrophonempfindlichkeit

$$M(f) = \frac{U(f)}{p(f)} \quad (2.10)$$

bezeichnet. Die Hydrophonempfindlichkeit ist im Allgemeinen eine komplexe Größe und wird als Kalibrierfaktor verwendet. Der Betrag der komplexen Größe wird häufig als Hydrophonübertragungsmaß in Dezibel $M_{dB} = 20 \cdot \log(M/M_0)$ angegeben, wobei als Bezugsempfindlichkeit $M_0 = 1 \text{ V/Pa}$ verwendet wird.

Bei Membranhydrophonen unterscheidet man des Weiteren zwischen koplanaren und bilaminaren Hydrophonen [19]. Ein koplanares Hydrophon besteht aus einer einlagigen piezoelektrischen Folie. Die Elektroden befinden sich auf den beiden Oberflächen und haben mit dem Wasser Kontakt. Das Wasser bildet bei der Messung einen parasitären Widerstand. Dementsprechend muss der Leitwert des Wassers geringgehalten werden, um den Effekt des parasitären Widerstandes gering zu halten. Daher verwendet man für die Messungen deionisiertes Wasser.

Bei einem bilaminaren Hydrophon ist die Membran zweilagig ausgeführt. Die spannungsführende Elektrode befindet sich zwischen den beiden Folien und ist damit von dem umgebenden Wasser isoliert. Die beiden äußeren Elektroden sind dabei mit dem Kabelschirm des Anschlusskabels verbunden und besitzen damit das gleiche elektrische Potential. An dem parasitären Widerstand des Wassers liegt damit keine Spannung an. Das Hydrophon ist dadurch unempfindlicher gegen Änderungen des Leitwerts des Wassers. Im Gegensatz dazu steht der

¹Für Hydrophone die anstelle einer Spannung eine andere physikalische Größe liefern, ist dies sinngemäß zu übertragen. Dies betrifft beispielsweise optische Hydrophone.

höhere Fertigungsaufwand, da die beiden Folien genau übereinander geklebt werden müssen, damit die sensitiven Elemente zusammenfallen. Die Verklebung ist auch hinsichtlich der Langzeitstabilität problematisch, da sich diese verändern oder gar lösen kann. Des Weiteren verringert sich die Resonanzfrequenz durch den zweischichtigen Aufbau, verglichen mit einem Hydrophon, das nur aus einer Folie besteht. Daher finden bilaminare Hydrophon für die Weitergabe der Einheit keine Anwendung.

2.4. Messung der Hydrophonspannung

Bei der Kalibrierung von Hydrophonen sind zwei Fälle zu unterscheiden. Der erste Fall betrifft Hydrophone, die zusammen mit einem Hydrophonverstärker (welcher meist fest in das Hydrophon integriert ist) kalibriert werden. Der Verstärker besitzt einen $50\ \Omega$ Ausgang und die Spannungsmessung erfolgt mit einem $50\ \Omega$ Abschlusswiderstand am Oszilloskopeingang. Die Hydrophonempfindlichkeit wird unter Einbeziehung der Verstärkercharakteristik bestimmt.

Der zweite Fall betrifft Hydrophone ohne Verstärker. Bei diesen wird die Empfindlichkeit auf ein offenes, das heißt hochohmig abgeschlossenes, Kabelende bezogen. Während der Messung wird die Quellenimpedanz Z_H des Hydrophons jedoch mit der Lastimpedanz Z_L des Eingangs belastet. Beim Eingang handelt es sich je nach Durchführung der Messung entweder um den Oszilloskopeingang oder um den Eingang eines zwischengeschalteten Messverstärkers. Die Impedanz des Hydrophons sowie des Eingangs werden mit einem Networkanalyzer in Reflexion gemessen. Sind die frequenzabhängigen Impedanzen bekannt, so kann anhand der gemessenen Spannung U_L die Spannung im Falle eines offenen Kabels (open cable) U_{OC} berechnet werden:

$$U_{OC} = \frac{Z_H + Z_L}{Z_L} U_L \quad (2.11)$$

Bei der Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit ist gegebenenfalls noch der Verstärkungsfaktor eines zusätzlich eingefügten Messverstärkers zu berücksichtigen.

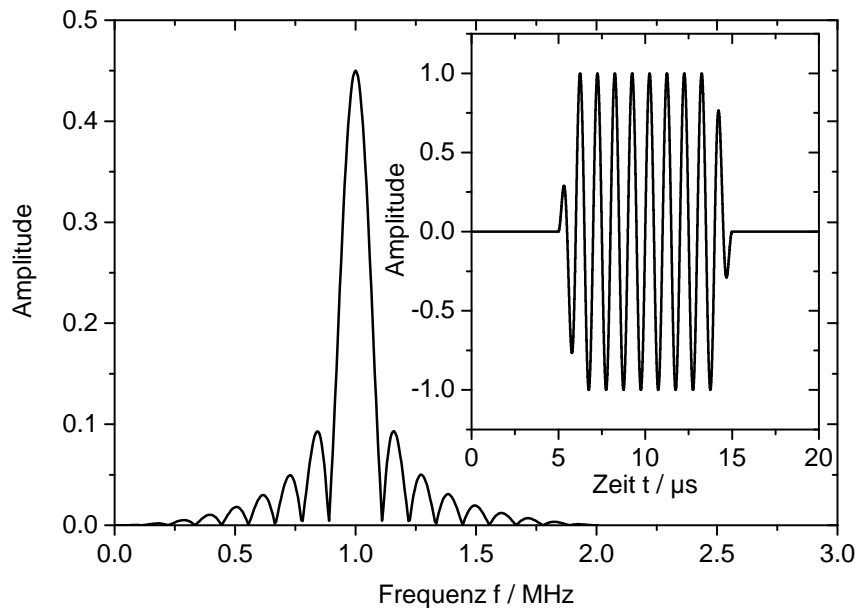


Abbildung 2.2.: Abbildung eines sinusförmigen Bursts mit einer Mittenfrequenz von 1 MHz und 10 Perioden im Zeitbereich sowie dem zugehörigen Frequenzspektrum.

2.5. Signale für die Burstanregung

Für die Erzeugung von Ultraschallbursts wird ein zeitlich begrenztes Sinussignal verwendet. Typisch sind Längen von 10 bis 30 Perioden mit einer Rechteckfunktion als Hüllkurve. Ein Zeitsignal und das zugehörige Spektrum ist in Abbildung 2.2 als Beispiel gezeigt. Solch ein Spannungssignal wird von einem Funktionsgenerator erzeugt und nach einer Verstärkung dem Ultraschallsendewandler zugeführt. Die Amplitude der Anregung ist dabei hinreichend klein, so dass die Ausbreitung der Ultraschallwelle im Wasser unter linearen Bedingungen erfolgt.

Im eingeschwungenen Zustand emittiert der Ultraschallwandler eine Ultraschallwelle mit der Frequenz der elektrischen Anregung. Für die Auswertung wird nur der mittlere Teil des eingeschwungenen Zustands verwendet. In dem Spektrum ist, abgesehen von der Verbreiterung des Spektrums durch die endliche Messdauer, nur eine Frequenz enthalten. Um die Hydrophonempfindlichkeit bei mehreren Frequenzen zu bestimmen, muss folglich nacheinander die Anregung mit Bursts bei weiteren Frequenzen wiederholt werden.

Eine Variante der Burstanregung ist die Verwendung von Ultraschallsignalen, deren Ausbreitung im Wasser nichtlinear erfolgt. Durch die Anregung mit hoher

Amplitude werden höhere Harmonische bei Vielfachen der Grundfrequenz generieren. Dieses Verfahren wird vom NPL und NIM eingesetzt, um Hydrophone simultan auch bei den höheren Harmonischen der Grundfrequenzen kalibrieren zu können [8, 12].

2.6. Impulsanregung unter Ausnutzung nichtlinearer akustischer Effekte des Wassers

Die Limitierung bei der Verwendung von Sinusbursts ist, dass man die verschiedenen Frequenzen nacheinander messen muss, wodurch sich eine lange Dauer der Messung ergibt. Gleichzeitig ist es nicht möglich den Phasengang des Hydrophons aus diesen Messungen zu bestimmen.

Eine alternative Möglichkeit für die Erzeugung des Ultraschallfeldes ist die Verwendung der Impulsanregung und das Ausnützen des nichtlinearen Verhaltens des Wassers bei hohen Schalldruckamplituden [20]. Dabei wird der Ultraschallwandler mit einem kurzen Spannungsimpuls mit hoher Amplitude angeregt. Dies geschieht beispielsweise dadurch, dass man einen geladenen Kondensator über den Sendewandler entlädt. Man erhält ein kurzes Signal mit einer großen Bandbreite. Die Nichtlinearität des Wassers bei hohen Schalldrücken sorgt dafür, dass während der Ausbreitung des Impulses Signalanteile bei höheren Frequenzen entstehen. Der Grund dafür ist, dass bei hohen Schalldrücken sich die Ultraschallwelle in der Überdruckphase mit einer höheren Geschwindigkeit ausbreitet als in der Unterdruckphase. Die Folge davon ist, dass mit der Zeit ein zunehmend steiler werdender Übergang von der Unterdruckphase in die Überdruckphase entsteht, welcher die hohen Frequenzanteile enthält. In einem räumlich begrenzten Bereich, üblicherweise der Fokus eines fokussierenden Wandlers, erhält man auf diese Weise ein breitbandiges Ultraschallsignal. Da die höheren Frequenzen erst während der Ausbreitung im Wasser entstehen, ist die räumliche Ausdehnung des Schallfeldes vergleichbar mit dem Schallfeld bei der Grundfrequenz des Wandlers. Dies ist vorteilhaft, da die Korrekturen für die räumliche Schallfeldmittelung auch bei hohen Frequenzen gering sind. Würde man das Signal mit einem Wandler direkt bei hohen Frequenzen erzeugen, so wäre aufgrund der Einschnürung des Schallfeldes aufgrund der Beugung die Korrekturen wesentlich größer.

Das typische Ultraschallsignal im Fokus des Wandlers ist für den Zeitbereich zusammen mit seinem Spektrum in Abbildung 2.3 gezeigt.

An ein Hydrophon (einschließlich der Verstärker) wird, um eine Kalibrierung mit der Impulsanregung durchführen zu können, folgende Anforderung gestellt. In jedem Frequenzintervall muss ein linearer Zusammenhang zwischen dem Schalldruck und der Hydrophonspannung vorliegen. Der lineare Bereich muss dabei mindestens bis zu dem Schalldruck reichen, bei dem die Kalibrierung durchgeführt wird. Wäre der lineare Zusammenhang nicht gegeben, so würden sich bei der Impulsanregung Intermodulationsprodukte in dem Signal der Hydrophonspannung ergeben, die eine Kalibrierung mit der Impulsanregung behindern.

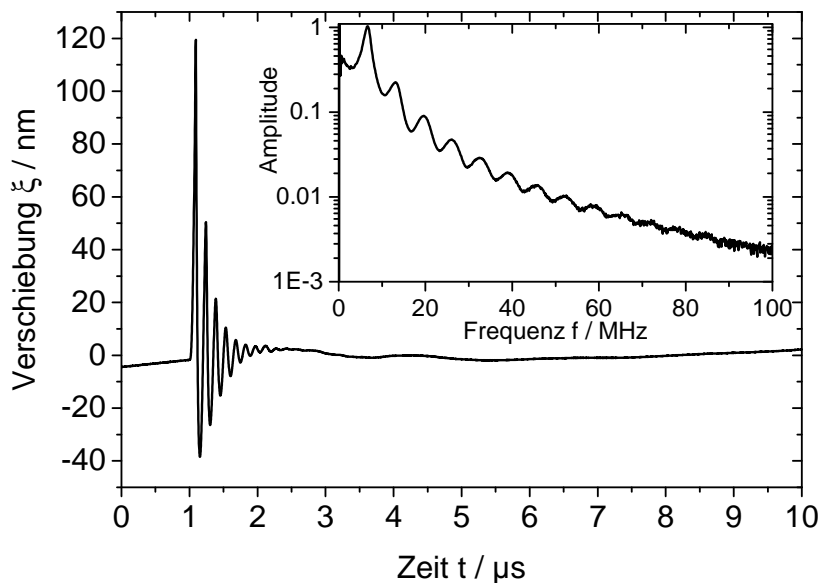


Abbildung 2.3.: Zeitsignal eines typischen Ultraschallimpulses. In dem eingefügten Diagramm ist das zugehörige Frequenzspektrum dargestellt.

Die heutigen Hydrophone erfüllen diese Anforderung. Dabei sei auch angemerkt, dass Hydrophone für die Messung von Schalldrücken eingesetzt werden, die größer sind, als bei der Kalibrierung. Daher ist das lineare Verhalten von Hydrophonen von grundsätzlicher Bedeutung.

2.7. Bestimmung von Amplitude und Phase mittels Fourier-Transformation

Die Signalauswertung erfolgt unter Verwendung der diskreten Fouriertransformation. Durch diese wird das Zeitsignal in den Frequenzraum transformiert. Für einen endlichen zeitdiskreten Datensatz mit n äquidistanten Samplewerten $x(m); m \in \{1, 2, \dots, n\}$, die während des Zeitintervalls T und mit einer Samplerate von $f_{\text{sample}} = \frac{n}{T}$ aufgezeichnet wurden, lautet die Transformationsgleichung:

$$X(k) = \sum_{m=1}^n x(m)w(m) \exp\left(-\frac{2\pi i}{n}(m-1)(k-1)\right) \quad (2.12)$$

$k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ist der Laufindex über den Frequenzbereich. Die Frequenzskala bestimmt sich zu

$$f(k) = \frac{k-1}{T}. \quad (2.13)$$

Frequenzen größer als $f_{\text{sample}}/2$ werden durch ihre negative Frequenz $f(k) - f_{\text{sample}}$ ersetzt, um spätere Berechnungen zu vereinfachen.

$w(m)$ ist der Gewichtungsfaktor einer Fensterfunktion. Die Fouriertransformation behandelt einen Datensatz periodisch fortsetzbar. Dies bedeutet insbesondere, dass eine Differenz zwischen dem letzten Datenpunkt und dem ersten Datenpunkt als Sprung behandelt wird. Dieser Fall tritt auf, wenn ein periodisches Signal untersucht wird und das Messintervall kein ganzzahliges vielfaches der Periodendauer ist. Die Fensterfunktion wird dazu eingesetzt, um diese potentielle Unstetigkeitsstelle zu beseitigen und ein periodisches Signal zu erzeugen. Einige gebräuchliche Fensterfunktionen sind in der Literatur [21] angegeben. Die Vielzahl der Fensterfunktionen ist dadurch bedingt, dass jede Fensterfunktion auf bestimmte Fragestellungen optimiert wurden. Es gibt beispielsweise die unter der Bezeichnung Flat-Top-Fenster bekannten Fenster, die den Amplitudenwert besonders gut reproduzieren, dabei aber die Frequenz ungenauer bestimmen.

Das Ergebnis der Fouriertransformation wird anschließend noch normiert. Die Amplitude der entsprechenden Fourier-Komponente lässt sich dann direkt ablesen und das Ergebnis wird unabhängig von der Anzahl der Samplepunkte n . Der Normierungsfaktor ist die Summe der Glieder der Fensterfunktion $W = \sum_{m=1}^n w(m)$. Wird keine Fensterfunktion verwendet, entspricht dieser Fall einem Rechteckfenster mit konstanten Wert von 1 und damit ist $W = n$.

$$X'(k) = \frac{2X(k)}{W} \quad (2.14)$$

Der Multiplikator 2 kompensiert, dass bei der Fouriertransformation die Amplituden symmetrisch auf positive und negative Frequenzen verteilt werden. Für ein Sinussignal mit der Frequenz f und der Amplitude A ergibt sich unter dieser Normierung dann nach der Transformation ein Betrag von A bei der Frequenzwert f .

Die Ableitung eines Signals im Zeitbereich lässt sich im Frequenzbereich der Fouriertransformierten entsprechend folgender Identität durchführen [22]:

$$\frac{\partial}{\partial t} x(t) \Leftrightarrow 2\pi i f X(f) \quad (2.15)$$

In dieser Gleichung ist die Berücksichtigung von negativen Frequenzen wichtig. Nur so bleibt die für reelle Zeitbereichsdaten geltenden Symmetrie der Fourierkoeffizienten bezüglich der komplexen Konjugation ($X(i) = X(N - i + 2)^*$ für $i \in \{2 \dots N\}$) erhalten.

Die Koeffizienten lassen sich sowohl in der kartesischen Darstellung $z = \Re(z) + i \cdot \Im(z)$ als auch in der Polardarstellung $z = |z| \exp(i \arctan(z))$ ausdrücken. Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Berechnung von Unsicherheiten ist im „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [23] beschrieben. Der GUM empfiehlt für die Berechnung die kartesische Darstellung der komplexen Werte, also in Form von Real- und Imaginärteil. Diese Empfehlung wird auch in der gesamten Berechnung berücksichtigt. Die Umrechnung in Amplitude und Phase erfolgt erst als letzter Schritt für die Darstellung der Resultate in Diagrammen.

Bei der Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit wird der Quotient $C = \frac{A}{B}$ der komplexwertigen Größen A und B gebildet. Daraus ergibt sich das Amplitudenverhältnis als $|C|$ und der Phasengang als $\arctan(C)$. Eine zeitliche Verzögerung von Δt ergibt einen zusätzlichen linearen Beitrag zu dem Phasengang, wie sich durch folgende Gleichung zeigen lässt:

$$A(f) \exp(-2\pi i f \underbrace{(t - \Delta t)}_{\text{Zeitliche Verzögerung}}) = \underbrace{A(f) \exp(-2\pi i f t)}_{\text{Ursprungssignal}} \exp(\underbrace{2\pi i f \Delta t}_{\text{Phase } \varphi(f)}) \quad (2.16)$$

Die zusätzliche lineare Steigung der Phase entspricht somit der zeitlichen Verzögerung. Bei der Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit ist es daher wichtig, dass die Messungen im gleichen Abstand erfolgen, um die zeitliche

Verzögerung gering zu halten. Eine eventuell verbleibende lineare Steigung im Phasengang wird sinnvollerweise korrigiert, bevor eine Mittelung von Signalen durchgeführt wird.

Eine Zusammenfassung über die Fouriertransformation und besonders der Vergleich zwischen verschiedenen Fensterfunktionen findet sich in [21].

2.8. Interferometrie

Zur Bestimmung der Auslenkung der Wasseroberfläche werden interferometrische Methoden verwendet. Ein allgemein bekannter Typ eines Interferometers ist das Michelson-Interferometer [24, 25].

In diesem wird ein Laserstrahl an einem Strahlteiler in einen Messstrahl und einen Referenzstrahl aufgespaltet. Die beiden Teilstrahlen werden jeweils an einem Spiegel reflektiert und durchlaufen den Strahlteiler erneut. Die Spiegel sind so ausgerichtet, dass nach dem Strahlteiler beide Laserstrahlen interferieren. Für die Interferenz wird die elektrische Feldstärke betrachtet, wobei im Folgenden von gleich polarisierten Strahlen ausgegangen wird.

Die Feldstärke des Messstrahls lässt sich ausdrücken durch

$$E_1 = A_1 \cos 2\pi \left(t \cdot f - \frac{r_1}{\lambda} - \delta_1 \right) \quad (2.17)$$

und die des Referenzstrahls durch

$$E_2 = A_2 \cos 2\pi \left(t \cdot f - \frac{r_2}{\lambda} - \delta_2 \right) \quad (2.18)$$

Dabei ist A_1 und A_2 die Amplitude der Feldstärke, f die Frequenz der Strahlung, r_1 und r_2 der jeweils zurückgelegte Weg und δ_1 und δ_2 die Phasenkonstanten.

Die Feldstärke der beiden überlagerten Strahlen ergibt sich als Summe $E = E_1 + E_2$. Die Intensität ergibt sich aus dem Zeitmittel der quadrierten Feldstärke.

$$J = \frac{1}{Z} \overline{E^2} \quad (2.19)$$

Z ist dabei der Wellenwiderstand, der im Vakuum den Wert von $Z = 377 \Omega$ besitzt. Empfänger für optische Strahlung, einschließlich den verwendeten Fotodioden, sind für die Intensität der optischen Strahlung empfindlich. Eine Fotodiode liefert einen zur Intensität proportionalen Fotostrom, der über einen Transimpedanzverstärker in ein stromproportionales Spannungssignal umgesetzt wird.

Für die interferierenden Strahlen ergibt sich, unter Anwendung des Additionstheorems der Kosinus Funktion, folgender Ausdruck:

$$J = \frac{1}{2Z} \left[A_1^2 + A_1^2 \cos 4\pi \left(tf - \frac{r_1}{\lambda} - \delta_1 \right) + A_2^2 + A_2^2 \cos 4\pi \left(tf - \frac{r_2}{\lambda} - \delta_2 \right) + 2A_1 A_2 \cos 2\pi \left(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_1 - \delta_2 \right) + 2A_1 A_2 \cos 2\pi \left(2tf - \frac{r_2 + r_1}{\lambda} - \delta_1 - \delta_2 \right) \right] \quad (2.20)$$

Die optischen Frequenzen liegen in der Größenordnung von $5 \cdot 10^{14}$ Hz und damit weit oberhalb der von einer Fotodiode auflösbaren Frequenz. Dementsprechend mittelt der Empfänger stets über eine große Anzahl an Schwingungsperioden. Die cos Terme die von der Zeit t abhängen ergeben somit als Mittelwert 0. Für die Intensität verbleibt somit:

$$J = \frac{1}{2Z} \left[A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos 2\pi \left(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1 \right) \right] \quad (2.21)$$

Oder ausgedrückt durch Intensitäten über die Beziehung $J_{1,2} = \frac{1}{2Z} A_{1,2}^2$ als

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos 2\pi \left(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1 \right) \quad (2.22)$$

Die Phasendifferenz $\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{r_2 - r_1}{\lambda} + \delta_2 - \delta_1 \right)$ entscheidet dabei, ob es zu einer konstruktiven ($\Delta\varphi = 2n\pi, n \in \mathbb{N}_0$) oder destruktiven Interferenz $\Delta\varphi = (2n + 1)\pi$ kommt. Bewegt man nun einen der Spiegel des Interferometers um die Strecke $\Delta x(t)$, so ändert sich die Länge des optischen Wegs um $2\Delta x(t)$. Der zusätzliche Beitrag zur Phase ist damit $\varphi(t)' = 4\pi \frac{\Delta x(t)}{\lambda}$.

Für die interferometrische Längenmessung kleiner Auslenkungen wird über einen elektrisch verstellbaren Spiegel die Phasendifferenz auf $\left(2n + \frac{1}{2}\right)\pi$ stabilisiert. Die Bewegung des zweiten Spiegels um $\Delta x(t)$ wird dann beobachtet. Durch die Stabilisierung verhält sich der Fotostrom nach der Gleichung

$$\Delta I(t) = I_0 \sin \left(4\pi \frac{\Delta x(t)}{\lambda} \right). \quad (2.23)$$

Mit der Näherung für kleine Argumente der trigonometrischen Funktionen gilt dann für den Fotostrom der Fotodiode

$$\Delta I(t) \approx I_0 4\pi \frac{\Delta x(t)}{\lambda}. \quad (2.24)$$

wobei diese Näherung die Messung auf kleine Auslenkungen beschränkt. Bei Auslenkungen, die über die Extremstellen der sin-Funktion hinausgehen, muss angemerkt werden, dass Mehrdeutigkeiten entstehen, da die sin-Funktion dann nicht injektiv ist.

Das Michelson Interferometer lässt sich zu einem Quadraturinterferometer erweitern. Das Ziel dabei ist es, die Mehrdeutigkeiten der cos-Funktion durch ein zusätzliches um 90° phasenverschobenes Signal aufzulösen. Dabei wird die Polarisation der Laserstrahlen ausgenutzt. Die Polarisationsrichtung der Strahlen wird so eingerichtet, dass sie in den beiden Armen des Interferometers orthogonal ist. Dadurch lassen sie sich weiterhin den einzelnen Pfaden zuordnen und interferieren nicht. Um die Strahlen auf unterschiedliche Weise analysieren zu können, werden sie an einem nichtpolarisierenden Strahlteiler in zwei Richtungen aufgeteilt. In die eine Richtung befindet sich ein Polarisationsfilter unmittelbar vor der Fotodiode, hier ist dies ein polarisierender Strahlteiler. Dieser ist so ausgerichtet, dass er die Polarisationsrichtung beider Strahlen so dreht, dass beide miteinander interferieren können. Es ergibt sich qualitativ das gleiche Signal wie im Falle des zuvor beschriebenen Michelson Interferometers, das nun mit dem Index I für Intensität bezeichnet wird.

$$J_I = J_1 + J_2 + \sqrt{J_1 J_2} \cos(\Delta\varphi + \varphi(t)') \quad (2.25)$$

In den anderen Weg nach dem nichtpolarisierenden Strahlteiler wird eine $\lambda/4$ -Verzögerungsplatte eingebracht. Diese Platte bewirkt, dass die eine Polarisationsrichtung eine um $\lambda/4$ größere optische Wegstrecke zurücklegen muss. Anschließend werden, wie bereits für das I -Signal, beide Strahlen auf einer weiteren Fotodiode zur Interferenz gebracht. Das sich ergebende Signal wird mit dem Index Q für Quadratur bezeichnet.

$$J_Q = J_1 + J_2 + \sqrt{J_1 J_2} \cos\left(\Delta\varphi + \varphi(t)' + \underbrace{2\pi \frac{\lambda}{4} \frac{1}{\lambda}}_{\frac{\pi}{2}}\right) \quad (2.26)$$

Das Signal ist damit um $\frac{\pi}{2}$ also 90° phasenverschoben zu dem J_I Signal. Stellt man beide Signale in einem J_I - J_Q -Diagramm dar, so ergibt sich für die Trajektorie eine Ellipse. Aus dem Drehsinn des Ortsvektors lässt sich die Bewegungsrichtung ermitteln. So lassen sich Bewegungen auch über mehrere Perioden des Interferenzsignales verfolgen und die Mehrdeutigkeiten auflösen.

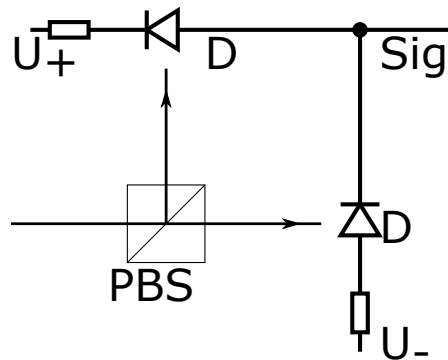


Abbildung 2.4.: Anordnung zur balancierten Detektion. Der polarisierende Strahlteiler (PBS) teilt den Strahl in zwei Richtungen. Die Fotodioden werden von einer symmetrischen Spannungsversorgung gespeist (U_+ und U_-). Der Gleichanteil führt in den beiden Fotodioden (D) zu dem gleichen Fotostrom, so dass die Spannung am Signalausgang (Sig) Null beträgt. Unterschiedliche Intensitäten bedingt durch Interferenz erzeugen eine messbare Spannung am Ausgang, die verstärkt werden kann.

Sind die Strahlen im Interferometer polarisiert, so kann die balancierte Detektion verwendet werden. Bei der balancierten Detektion werden zwei Fotodioden und ein polarisierender Strahlteiler kombiniert. Der Aufbau ist in Abbildung 2.4 gezeigt. Dadurch lässt sich der Beitrag des Gleichlichtes am elektrischen Signal weitestgehend unterdrücken und der Spannungshub verdoppeln. Die Spannungsverdopplung kommt dadurch zustande, dass eine Phasenverschiebung von 180° eine Änderung der Polarisationsrichtung bewirkt. Der Strahl wird dementsprechend von dem polarisierenden Strahlteiler in die andere Richtung abgelenkt.

2.9. Vibrometer - Heterodyne Interferometrie

Ein Vibrometer misst Vibrationen im Pico- bis Mikrometerbereich. Der schematische Aufbau eines Vibrometers ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Besonderheit bei einem Vibrometer ist, dass Referenz- und Messstrahl einen definierten Frequenzunterschied der optischen Frequenzen besitzen. Dieser Unterschied wird durch Verwendung einer Bragg-Zelle (akustooptischer Modulator) aus demselben Laserstrahl erzeugt. Der Frequenzunterschied ist dabei Δf und ist klein im

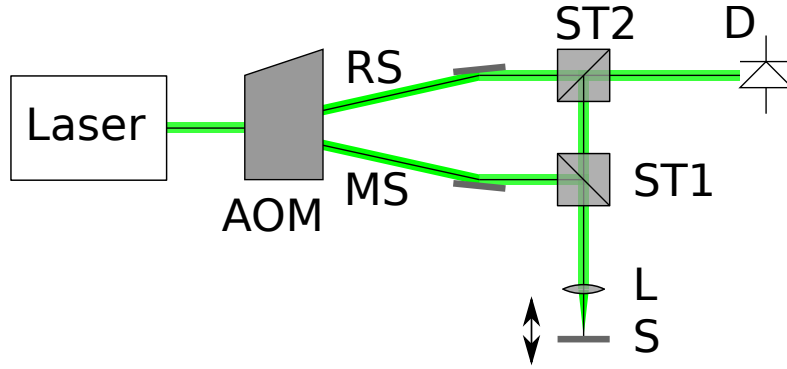


Abbildung 2.5.: Schematischer Aufbau des Vibrometers. Der Laserstrahl wird durch einen akustooptischen Modulator (AOM) in zwei Strahlen mit unterschiedlicher optischer Frequenz aufgeteilt. Der Messstrahl (MS) wird durch einen Strahlteiler (ST1) abgelenkt und mittels einer Linse (L) auf dem beweglichen Spiegel (S) fokussiert. Der am Spiegel reflektierte Strahl durchläuft erneut die Linse und den Strahlteiler und wird durch einen weiteren Strahlteiler (ST2) mit dem Referenzstrahl (RS) vereinigt und auf der Fotodiode (D) zur Interferenz gebracht.

Vergleich zur optischen Frequenz und groß im Vergleich zu der zu messenden Vibrationsfrequenz. Überlagern sich beide Strahlen auf der Fotodiode, so ergibt sich im stationären Fall ein Spannungssignal der Fotodiode mit der Frequenz Δf . Die Bewegung des Spiegels auf der Wasseroberfläche führt zu einer Änderung der optischen Weglänge. Damit ändert sich auch die Phasendifferenz $\varphi(t)$ zwischen Referenz- und Messstrahl. Als Spannungssignal der Fotodiode ergibt sich dann ein phasenmoduliertes Signal [26, 27] entsprechend der folgenden Gleichung:

$$U_{PD}(t) = U_0 \sin(2\pi\Delta f t + \varphi(t) + \varphi_0) \quad (2.27)$$

U_0 ist die Amplitude der Fotodiodenspannung und φ_0 ist eine willkürliche Startphase. Das Signal $\varphi(t)$ wird durch Demodulation rekonstruiert. Der Extremwert für die Phase $\varphi(t)$ wird als Phasenhub bezeichnet.

Details zum Vibrometer finden sich in den Veröffentlichungen von Mitarbeitern des Herstellers der Vibrometers [28, 29, 30, 31, 32]. Für eine weitergehende Beschreibung der Phasenmodulation siehe [26].

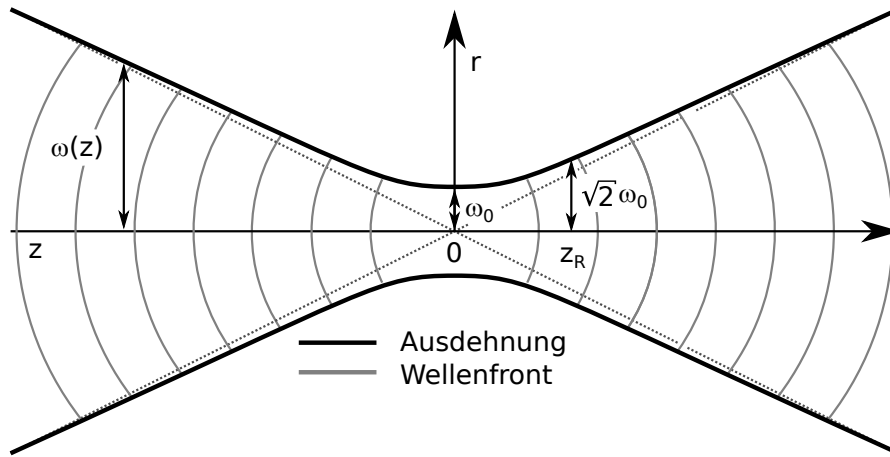


Abbildung 2.6.: Skizze zur Veranschaulichung der Fokussierung eines Gauß-Strahls. Basierend auf einem Werk von N (Aleph), <http://commons.wikimedia.org> Lizenz: CC BY-SA 4.0

2.10. Gauß-Strahl, Gouy-Phase und deren Einfluss auf die Messung

Ein Laserstrahl lässt sich als Gauß-Strahl annähern. Ein Gauß-Strahl besitzt radial ein Gauß-förmiges Intensitätsprofil. Für einen kollimierten Gauß-Strahl mit einem Strahlradius ω_0 und einer Wellenlänge λ ist die Rayleighlänge definiert als:

$$z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (2.28)$$

Wird dieser Strahl durch eine dünne Linse mit der Brennweite f fokussiert, beträgt nach der Linse der z-abhängige Strahlradius (z ist die Bildweite)

$$\omega'_0(z) = \frac{\omega_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{z_R}{f}\right)^2}} \quad (2.29)$$

Für einen Strahl mit geringer Divergenz ($z_R \gg f$) liegt nach der Linse die Strahltaile in guter Näherung am Ort des Brennpunkts ($z = f$). Dort ist der Strahlradius minimal und beträgt:

$$\omega'_0(f) = \frac{\omega_0 f}{z_R} \quad (2.30)$$

Durch die Fokussierung krümmen sich die Wellenfronten des Strahls im Bereich der Brennpunkte. Entlang der optischen Achse tritt dadurch ein zusätzlicher

Phasenbeitrag bei der Vibrometermessung auf. Dieser Effekt ist unter dem Begriff Gouy-Phase bekannt. Die Phase für den reflektierten Laserstrahl beträgt in diesem Fall:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda}z(t) - 2 \arctan \left(\frac{z(t)}{z_R} \right) \underset{z(t) \ll z_R}{\approx} \left(\frac{4\pi}{\lambda} - \frac{2}{z_R} \right) z(t) \quad (2.31)$$

Der zusätzliche Summand beschreibt eine reduzierte effektive Wellenlänge. Dies verringert den Wert für die gemessene Auslenkung. Weitere Beschreibungen und Untersuchungen dazu finden sich in [18, 29, 33].

2.11. Unsicherheitsbetrachtung für komplexwertige Größen

Die Unsicherheitsbetrachtung erfolgt nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [34]. Da mit komplexen Zahlen gerechnet wird, ist zusätzlich die Erweiterung für mehrdimensionale Ausgangsgrößen [23] relevant.

Die grundsätzliche Vorgehensweise wird hier an einem einfachen Beispiel mit zwei unkorrelierten Größen erläutert. Die Eingangsgrößen sind A und B , das Ergebnis ist $Y = A \cdot B$. Die zugehörigen Messwerte sind die komplexen Zahlen a und b . Ihr Unsicherheitsbeitrag wird durch Kovarianzmatrizen \mathbf{U}_a und \mathbf{U}_b beschrieben. Die Kovarianzmatrix setzt sich wie folgt zusammen:

$$\mathbf{U}_a = \begin{bmatrix} u_{a,ReRe} & u_{a,ReIm} \\ u_{a,ReIm} & u_{a,ImIm} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Die Modellgleichung lautet

$$Y = A \cdot B \quad (2.33)$$

mit den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial Y}{\partial A} = B \text{ und } \frac{\partial Y}{\partial B} = A. \quad (2.34)$$

Das Ergebnis der Modellgleichung ist dann $y = a \cdot b$. Die Auswertung der partiellen Ableitungen ergibt die komplexen Zahlen

$$\left. \frac{\partial Y}{\partial A} \right|_{a,b} = b \text{ und } \left. \frac{\partial Y}{\partial B} \right|_{a,b} = a. \quad (2.35)$$

Eine komplexe Zahl z lässt sich in Matrixschreibweise darstellen als

$$\mathbf{Z} = \text{matrix}(z) = \begin{bmatrix} \Re(z) & -\Im(z) \\ \Im(z) & \Re(z) \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Damit lässt sich die 2×4 Sensitivitätsmatrix darstellen als

$$\mathbf{C} = \left[\left. \frac{\partial Y}{\partial A} \right|_{a,b}, \left. \frac{\partial Y}{\partial B} \right|_{a,b} \right] = [\text{matrix}(b), \text{matrix}(a)]. \quad (2.37)$$

Die 4×4 Gesamtkovarianzmatrix ist

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{U}_b \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

mit der (2×2) Nullmatrix $\mathbf{0}$, die die Korrelationsfreiheit zwischen den Eingangsgrößen beschreibt. Die 2×2 Kovarianzmatrix für das Ergebnis y ergibt sich dann als

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{C} \mathbf{U} \mathbf{C}^T. \quad (2.39)$$

\mathbf{C}^T bezeichnet dabei die transponierte Matrix. Die Einträge auf der Diagonale der Kovarianzmatrix sind dabei ein Maß für die Unsicherheit für den Realteil respektive den Imaginärteil. Die Nichtdiagonalelemente beschreiben die Korrelation zwischen dem Real- und Imaginärteil. Weiteres zur Unsicherheitsberechnung von komplexwertigen Größen findet sich in [35].

3. Kalibrierung von Hydrophonen unter Verwendung des Vibrometers

In diesem Abschnitt wird der neu aufgebaute Messplatz einschließlich der verwendeten Geräte vorgestellt und das Verfahren der Hydrophonkalibrierung erläutert.

Eine Fotografie des Messaufbaus ist in Abbildung 3.1 zu sehen. Ein schwingungsisolierter optischer Tisch mit den Abmessungen $(1 \times 2) \text{ m}^2$ bildet die Grundlage für den Messstand. Auf dem Tisch befindet sich das Stativ mit dem Vibrometer. Der Wassertank mit dem Ultraschallwandler steht auf einer durch Motoren verschiebbaren Plattform. Um den Tisch herum ist eine Einhausung gebaut, die die Messung vor Umwelteinflüssen schützt. Die Einhausung dient gleichzeitig auch als Stellfläche für die notwendigen Messgeräte und den Messrechner.

Die Hydrophonkalibrierung erfolgt durch Vergleich der gemessenen Hydrophonspannung mit dem gemessenen Schalldrucksignal des Ultraschallfeldes. Dazu wird für beide Messungen das gleiche Test-Schallfeld verwendet.

Für die Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit müssen mindestens folgende frequenzabhängige Größen ermittelt werden. Erstens, die Auslenkung der Folie $\xi(f)$ während der Anregung mit dem Ultraschallsignal, gemessen mit dem Vibrometer. Zweitens, der Transmissionsfaktor der Folie $T(f)$, berechnet anhand der akustischen Eigenschaften der Folie. Drittens, die Hydrophonspannung $U(f)$ während der Anregung mit dem Ultraschallsignal. Die sensitive Fläche des Hydrophons besitzt eine räumliche Ausdehnung, über die der Schalldruck variiert. Das Hydrophon ermittelt daher nur den mittleren Schalldruck. Die Korrektur der räumliche Mittelung $F_{sp}(f)$ muss daher berücksichtigt werden. Zusätzlich muss die Schallgeschwindigkeit c_w und die Dichte ρ_w des Wassers bekannt sein. Die Hydrophonempfindlichkeit $M(f)$ berechnet sich dann nach der Gleichung:



Abbildung 3.1.: Gesamtansicht des Messplatzes. In der Bildmitte ist der optische Tisch mit dem darauf aufgebauten Vibrometer zu sehen. Auf der Einhausung befinden sich die für die Messung benötigten Geräte.



Abbildung 3.2.: Vergrößerter Ausschnitt des Messplatzes während einer Messung mit dem Vibrometer. Das Vibrometer befindet sich in dem blauen Gehäuse. An dem Objektiv ist die Folienhalterung befestigt. Der Ultraschallwandler ist am Boden des Wassertanks zu erkennen. Auf der rechten Seite befindet sich die 3-Achs-Positioniereinheit. Mit ihr lässt sich der gesamte Tank verfahren und dadurch der Wandler relativ zu dem Messpunkt des Vibrometers ausrichten.

$$M(f) = U(f)F_{sp}(f)\frac{T(f)}{2\pi if\zeta(f)\rho_w c_w} \quad (3.1)$$

Der Term $2\pi if\zeta(f)$ mit $i = \sqrt{-1}$ bestimmt aus der Auslenkung der Folie die Geschwindigkeit selbiger. Vergleiche dazu auch Gleichung 2.15 auf Seite 16.

In Kapitel 4 wird die Messunsicherheit betrachtet. Dort wird die Gleichung erneut aufgegriffen und um weitere Korrekturgrößen und Unsicherheitsbeiträge ergänzt werden. Zunächst aber Näheres zu dem Messaufbau und den verwendeten Geräten.

3.1. Messung mit dem Vibrometer

In der ersten Teilmessung wird mit Hilfe des Vibrometers der Ultraschallwechseldruck im Schallfeld bestimmt. Der dafür eingesetzte Aufbau ist in Abbildung 3.3a) als Blockschaltbild skizziert. Der Impulsgenerator regt den Ultraschallwandler mit einem Spannungsimpuls an. Daraufhin sendet der Ultraschallwandler, der sich am Boden des Wassertanks befindet, eine Ultraschallwelle ab. Die Ultraschallwelle trifft idealerweise senkrecht auf die Wasseroberfläche und wird an dieser reflektiert. Die um mehrere Größenordnungen unterschiedlichen Schallkennimpedanzen von Wasser und Luft bedingen, dass die Ultraschallwelle nicht in Luft übergehen kann, sondern nahezu vollständig reflektiert wird. Bei diesem Vorgang wird die Wasseroberfläche ausgelenkt. Die Auslenkung der Wasseroberfläche ζ wird optisch mit dem Laser-Vibrometer detektiert. Aus der Auslenkung wird während der Auswertung der zugehörige Ultraschalldruck berechnet.

Auf die Wasseroberfläche liegt eine $0,9\,\mu\text{m}$ dicke Folie aus Polyethylenterephthalat (PET) auf. Die Folie ist luftseitig mit einer $50\,\text{nm}$ dicken Aluminiumschicht bedampft, die als Spiegel für die Laserstrahlung dient. Die Folie beeinflusst die Reflexion der Ultraschallwelle. Dieser Einfluss wird in der Auswertung durch die Folienkorrektur berücksichtigt.

Der Abstand zwischen Ultraschallwandler und Folie wird anhand der Laufzeit des Ultraschallsignals eingestellt. Die optimale Laufzeit ist von dem Ultraschallwandler abhängig und wird für jeden Ultraschallwandler vorab ermittelt. Bei fokussierenden Wandlern wird der Abstand so gewählt, dass der Ultraschall auf der Folie fokussiert wird. Die laterale Ausrichtung zwischen dem Wandler und dem Messpunkt des Vibrometers erfolgt durch Ermitteln des Ortes des maximalen Schalldrucks. Praktischerweise erfolgt dies durch lineares Abrastern

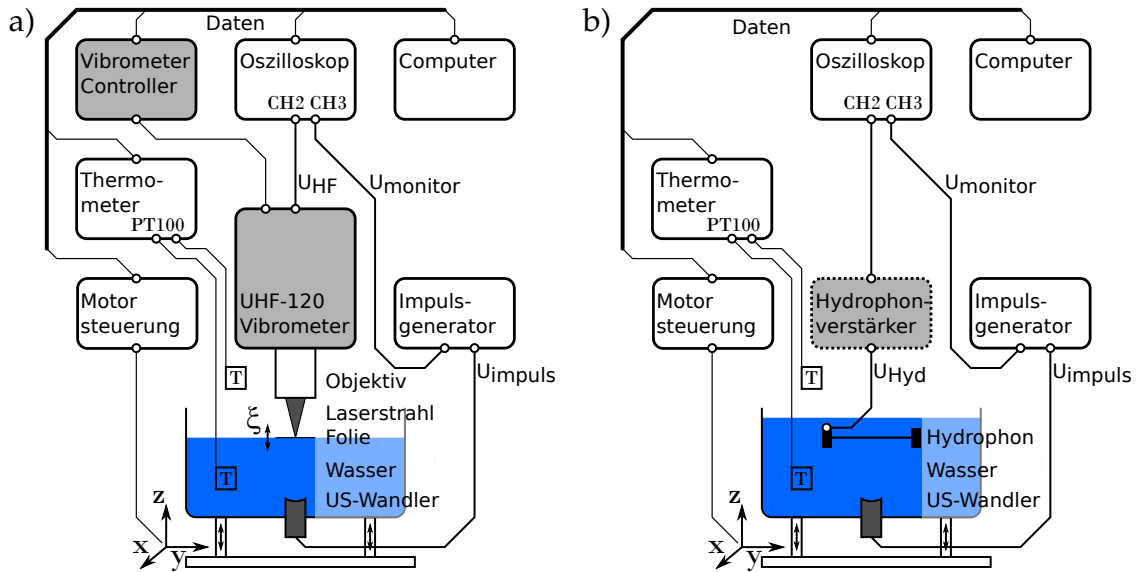


Abbildung 3.3.: Schematischer Aufbau einer Vibrometermessung (a) und einer Hydrophonmessung (b). Die zwischen den einzelnen Messungen geänderten Komponenten sind grau hinterlegt. Der Hydrophonverstärker ist schraffiert gezeichnet, da er abhängig von den Messanforderungen optional eingesetzt wird.

des Ultraschallfeldes in Richtung der x- und y-Achse. Für die Bestimmung des Maximums wird eine Parabel an die Daten angefitet und deren Scheitelpunkt bestimmt. An dem Ort des maximalen Schalldrucks wird die Auslenkung der Folie mit dem Vibrometer gemessen, um daraus den Schalldruck zu bestimmen.

Aus dem lateralen Scan wird die räumliche Verteilung des Schallfelds bestimmt. Diese Information wird für die Bestimmung der räumlichen Mittelungskorrektur des Hydrophons benötigt. Das empfindliche Element eines Hydrophons hat typischerweise einen Durchmesser von 0,1 mm bis 0,5 mm. Der Schalldruck ist nicht konstant über die Fläche des Hydrophons und das Hydrophon liefert daher ein Signal proportional zum mittleren Schalldruck. Die Mittelungskorrektur sorgt dafür, dass das Hydrophonsignal auf den Spitzenschalldruck bezogen wird.

3.2. Messung der Hydrophonspannung

In der zweiten Teilmessung wird die Signalspannung des zu kalibrierenden Hydrophons während der Anregung mit der Ultraschallwelle ermittelt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.3b) dargestellt. Die Bedingungen für die Messungen sind identisch wie bei der Messung mit dem Vibrometer, damit das

Schallfeld reproduziert werden kann. Das Hydrophon wird in den gleichen Abstand gebracht, in welchem sich zuvor die Folie befand, um die Messung an der gleichen Position im Schallfeld durchzuführen. Der Abstand wird anhand der Signallaufzeit ermittelt. Eine besonders feine Justage des Abstandes ist automatisch über eine Programmroutine möglich. Dazu wird das Signal des Hydrophons aufgezeichnet und die zeitliche Verzögerung gegenüber dem zuvor gemessenen Vibrometersignal ermittelt. Anhand des Ergebnisses wird dann die optimale z-Position berechnet und diese angefahren. Anschließend wird die Messung wiederholt und gegebenenfalls der Abstand solange angepasst, bis der optimale Abstand erreicht ist. Die Positionierung des Hydrophon in der x-y-Ebene erfolgt wie bei der Vibrometermessung durch lineares Abrastern des Schallfeldes und dem Finden des maximalen Spitze-Spitze Werts für die Hydrophonspannung.

Der Wasserstand in dem Tank wird für die Messung erhöht, damit das Hydrophon vollständig in das Wasser eintaucht und auf beiden Seiten der Membran sich Wasser befindet. Gleichzeitig sorgt die über dem Hydrophon liegende Wasserschicht dafür, dass Reflexionen der Ultraschallwelle an der Wasseroberfläche das Hydrophon während der Signalerfassungszeit nicht erneut erreichen können. Die zeitliche Hydrophonspannung wird mit einem WavePro 725Zi-A Oszilloskop (*Teledyne LeCroy, Chestnut Ridge, USA*) erfasst. In der Auswertung wird der Amplitudengang des Oszilloskops berücksichtigt und korrigiert. Abhängig von der Art des Hydrophons ergeben sich verschiedenen Varianten für die Messung.

Ein aktives Hydrophon mit eingebautem oder fest zugeordnetem Verstärker wird zusammen mit dem Verstärker kalibriert. Dazu wird der Signalausgang über einen $50\ \Omega$ Durchführungswiderstand mit dem hochohmigen Oszilloskopeingang verbunden. In der Hydrophonempfindlichkeit ist damit der Verstärkungsfaktor und der Verstärkerfrequenzgang mit einbezogen.

Passive Hydrophone werden mit dem hochohmigen Oszilloskopeingang verbunden. Als Kalibrierfaktor wird in diesem Fall die Empfindlichkeit des Hydrophons am offenen Kabelende angegeben. Dazu wird die Lastkorrektur berechnet, ausgehend von der Lastimpedanz des Oszilloskopeingangs und der Quellenimpedanz des Hydrophons.

Bei unempfindlichen Hydrophonen oder kleinen Ultraschalldrücken ist es notwendig einen Signalverstärker dem Oszilloskopeingang vorzuschalten. In diesem Fall werden in der Auswertung der Verstärkungsfaktor sowie die Eingangsimpedanz des Verstärkers für die Berechnung der Lastkorrektur herangezogen.

3.3. Vibrometer

Bei dem eingesetzten Vibrometer handelt es sich um ein Ultra-Hochfrequenz-Vibrometer UHF-120 (*Polytec GmbH, Waldbronn, Deutschland*) [31]. Die Wellenlänge der Laserstrahlung beträgt 532 nm. Die Laserstrahlung wird durch Frequenzverdopplung der Strahlung einer Halbleiter-Laserdiode erzeugt. Innerhalb des Vibrometers wird durch eine Braggzelle ein Frequenzunterschied von 618 MHz zwischen Mess- und Referenzstrahl generiert. Der Messstrahl wird auf die Wasseroberfläche durch ein Mikroskopobjektiv fokussiert und an dieser reflektiert. Der Referenzstrahl wird innerhalb des Vibrometers weitergeleitet. Beide Strahlen werden anschließend auf einer Hochfrequenzfotodiode zur Interferenz gebracht. Bei der Interferenz entsteht ein hochfrequentes phasenmoduliertes Signal (siehe auch 2.9 auf Seite 20). Die Trägerfrequenz liegt dabei bei 618 MHz. Die Signalspannung der Fotodiode wird direkt mit dem Oszilloskop WavePro 725Zi-A digitalisiert und an den Computer übermittelt. Dort vollzieht die Software *Polytec Vibrometer Software 5.1.1.0* die Signaldemodulation auf numerischem Wege. Die Software berücksichtigt dabei auch den Amplitudengang des Verbindungskabels zusammen mit dem Oszilloskopeingang. Als Ergebnis liefert die Software den zeitlichen Verlauf der Auslenkung der Folie. Weitere Information zu dem Vibrometer finden sich auch in [30, 31, 32].

3.4. Ultraschallsignalerzeugung

Der Ultraschalldruck wird in Wasser ermittelt. Dazu befindet sich der Ultraschallwandler in einem zylinderförmigen Tank. Der Tank hat einen Innendurchmesser von 240 mm und kann maximal 6,5 L Wasser aufnehmen. Für die Impulskalibrierung ist der Tank mit etwa 3 L Wasser gefüllt, wobei sich die Füllhöhe nach dem Abstand zwischen Ultraschallwandler und der aus der Wasseroberfläche aufliegende Folie bei der Vibrometermessung richtet. Der Ultraschallwandler ist in dem Boden des Tanks eingelassen. Für die Experimente wurden verschiedene kommerzielle Tauchtechnikwandler und verschiedene Arten der Signalerzeugung eingesetzt.

3.4.1. Ultraschallwandler für die Impulsanregung

Für die Impulsanregung wird der fokussierende Ultraschallwandler TS 12 PB 3-12 P 50 (*Karl Deutsch, Wuppertal, Deutschland*) verwendet. Er besitzt einen Außendurchmesser von 16 mm und eine geometrische Brennweite von 50 mm. Das an dem Wandler fest angeschlossenen Kabel mit BNC-Stecker hat einer Länge von 1,48 m. Der Arbeitsabstand, in dem die Messungen durchgeführt werden, beträgt etwa 47,5 mm. Der Abstand wird über die Ultraschalllaufzeit eingestellt, die in diesem Fall 32 μ s beträgt.

Für die Signalerzeugung wird ein Impulsgenerator verwendet. Er ist eine Eigenentwicklung der PTB. Intern wird ein Kondensator auf eine wählbare Spannung (126 V, 161 V, 236 V, 280 V oder 350 V) aufgeladen und mit wählbarer Wiederholfrequenz über den Ultraschallwandler entladen. Der Impulsgenerator liefert zusätzlich ein Triggersignal. Dieses wird dazu verwendet, die Signalerfassung mit dem Oszilloskop mit dem elektrischen Impuls zu synchronisieren. Dadurch ist es möglich über mehrere Signale zu mitteln. Der Monitorausgang gibt ein um den Faktor 1:100 skaliertes, elektrische Spannungssignal aus. Dieses wird zur Kontrolle des elektrischen Signales mit dem dritten Oszilloskopkanal aufgezeichnet. Es wurde die niedrigste Impulswiederholrate von 125 Hz gewählt. Dadurch wird sowohl der Energieeintrag in den Wandler geringgehalten und gleichzeitig sichergestellt, dass innerhalb des Tanks mehrfach reflektierte Ultraschallsignale bis zum nächsten Anregungspuls abgeklungen sind.

In Abbildung 3.4 ist das Ultraschallsignal bei den Spannung 126 V, 236 V und 350 V gezeigt. Bei einer Spannung von 126 V ist die sich ausbreitende Ultraschallwelle nur schwach nichtlinear und es ergibt sich bei hohen Frequenzen eine geringe Signalamplitude. Bei einer Anregungsspannung von 350 V erzeugt die erste und zweite Periode des Ultraschallsignals eine ausgeprägte nichtlineare Anregung des Wassers. Dadurch ergibt sich eine Periodizität im Zeitbereich, was zu ausgeprägten lokalen Minima im Frequenzspektrum führt. Im Bereich der Minima ist das Signal-Rausch-Verhältnis geringer und die räumliche Mittelungskorrektur besitzt einen größeren Wert. Als Kompromiss wurde eine Anregungsspannung von 236 V bevorzugt verwendet, da hier nur in der ersten Schwingungsperiode die nichtlineare Schallausbreitung im Wassers ausgeprägt ist. In der zweiten Periode ist der Effekt der Nichtlinearität bereits gering. Dadurch wird vermieden, dass im höheren Frequenzbereich ein periodisches Signal entsteht [36].

Durch Variation der Kabellänge, das heißt der elektrischen Impedanz, zwischen Impulsgenerator und Ultraschallwandler wird das Spektrum des abgestrahlten Impulses beeinflusst [37]. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.5 für drei unterschiedliche Kabellängen gezeigt. Auf diese Weise lassen sich die Lagen der lokalen Schalldruckmaxima verschieben. Durch Mittelung der Hydrophonempfindlichkeiten aus Messungen bei den verschiedenen Anregungsimpulsen lässt sich in allen Frequenzbereichen ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erzielen.

3.4.2. Ultraschallwandler für die Burstanregung

Für die Burstanregung wird für den Frequenzbereich von 1 MHz bis 25 MHz ein ebener Ultraschallwandler vom Typ STS 6WB 4-20 (*Karl Deutsch*) verwendet. Für den Frequenzbereich von 5 MHz bis 60 MHz wird ein Folienwandler vom Typ IAP-F 50.3.2 (*Krautkrämer, inzwischen General Electric, Boston, USA*) verwendet. Das Burstsinal wird von einem Funktionsgenerator AFG 3251 (*Tektronix, Beaverton, USA*) erzeugt. An diesem Funktionsgenerator wird die Spannungsamplitude, die Frequenz, und die Anzahl der Perioden vorgegeben. Das Signal wird über einen Leistungsverstärker 350L (*ENI, inzwischen Electronics & Innovation, Rochester, USA*) verstärkt. Über ein LC-Netzwerk wird die Impedanzanpassung von dem Verstärkerausgang an den vergleichsweise hochohmigen Wandlereingang vorgenommen. Die Spannung am Wandler wird mittels Tastkopf mit dem Oszilloskop gemessen. Anhand dieser Messung wird das Impedanznetzwerk so abgeglichen, dass die Wandlerspannung maximiert wird. Dies ist gleichbedeutend damit, dass der Schalldruck maximiert wird. Gleichzeitig wird mit der Messung verifiziert, dass sowohl bei der Folienmessung als auch der Hydrophonmessung bei der jeweiligen Frequenz die gleiche Spannungsamplitude am Ultraschallwandler anliegt.

Mit einer Burstanregung kann in jedem Messdurchgang die Hydrophonempfindlichkeit bei einer Frequenz bestimmt werden. Bei einem Burst großer Schalldruckamplitude, der die nichtlineare Schallausbreitung im Wasser nutzt, können auch die höheren harmonischen Frequenzen für die Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit herangezogen werden, vergleiche dazu auch [8].

Für die Bestimmung der Amplitude des Bursts wird zunächst der mittlere Bereich des Bursts ausgeschnitten, in welchem das Signal sich in einem eingeschwungenem Zustand befand. Die Bestimmung der Amplitude erfolgt mittels der diskreten Fourier-Transformation (siehe auch 2.7 auf Seite 15). Die Wahl der

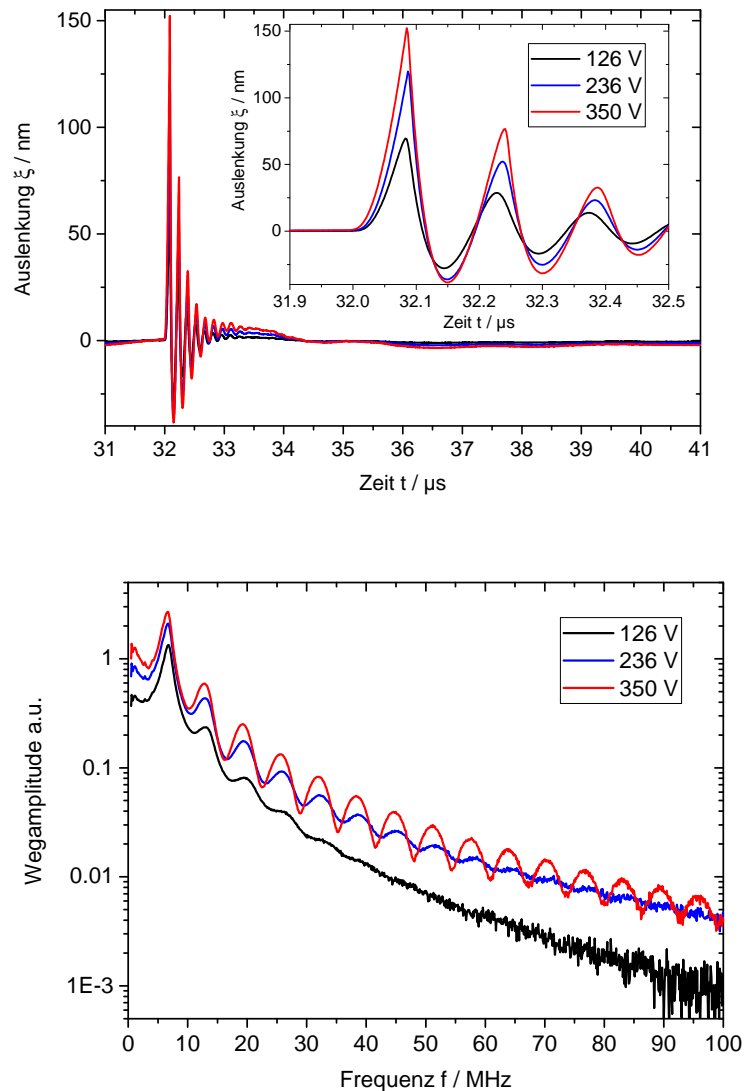


Abbildung 3.4.: Impulssignal im Zeitbereich (oben) und Signalspektrum (unten) bei unterschiedlichen Spannungen. Bei einer Spannung von 126 V ist die Amplitude bei hohen Frequenzen gering. Bei einer Spannung von 350 V besitzen die erste und zweite Signalperiode (siehe oberes Diagramm im vergrößerten Ausschnitt) eine ausgeprägte Nichtlinearität, erkennbar an dem spitz zulaufenden Signalmaximum. Dadurch ergibt sich eine Periodizität im Zeitsignal, die zu ausgeprägten lokalen Minima im Spektrum führt. Die Spannung von 236 V wurde als Kompromiss zwischen Signalstärke und Glattheit gewählt.

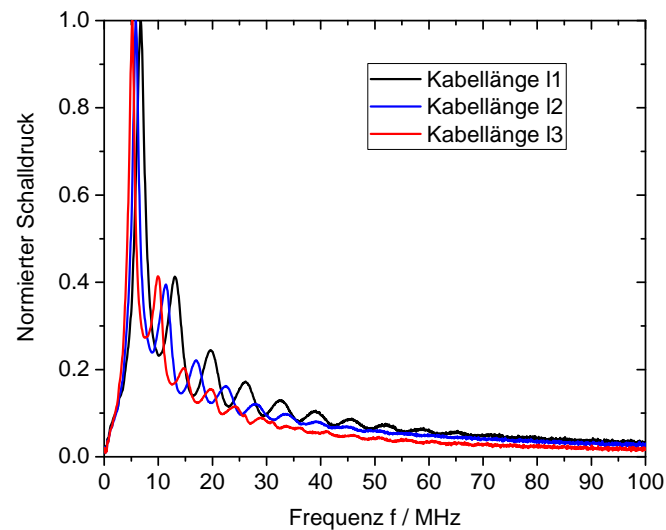


Abbildung 3.5.: Einfluss der Kabellänge auf das Impulsspektrum bei einer Anregungsspannung von 236 V. Es gilt für die Kabellängen $l_1 < l_2 < l_3$. Die Kabellänge l_1 entspricht dem Fall des direkten Anschlusses des Ultraschallwandlers über sein fest verbundenes Kabel (1,48 m) an den Impulsgenerator. Für l_2 wurde das Kabel mit einem BNC-Kabel um 0,88 m verlängert. Für l_3 wurde eine weitere Verlängerung von 1,00 m zusätzlich eingefügt.

Fourier-Transformation gegenüber anderen Methoden wie der Ermittlung von Spitze-Spitze-Werten, ist darin begründet, dass es eine einfach umsetzbare und mathematisch zuverlässige Methode ist in die bei der Berechnung alle Datenpunkte eingehen. Um einen Leckeffekt aufgrund einer nicht ganzzahligen Vielfachen der Fensterlänge gegenüber der Periodendauer zu vermeiden, wird eine Fensterfunktion für die Fourier-Transformation eingesetzt. Es wird ein Flat-Top Fenster verwendet, da mit diesem die Unsicherheit der Amplitudenbestimmung gering bleibt.

3.5. Mechanik

Der optische Tisch (*Opta, Bensheim, Deutschland*) wird über die 4 passiven Schwingungsdämpfer durch Aufpumpen mit einer Fahrradluftpumpe in die Horizontale nivelliert. Die Verwendung passiver Schwingungsisolatoren gewährleistet, dass

nach einer statischen Auslenkung des Tisches dieser wieder in die Ausgangslage zurückkehrt. Der Laserstrahl des Vibrometer wird vertikal ausgerichtet. Dazu wird die Reflexion des kollimierten Laserstrahls an einer freien Wasseroberfläche verwendet, während kein Objektiv an dem Vibrometer angebracht ist. Die in dem Vibrometer eingebaute Kamera liefert dadurch ein Bild, aus dem die Lage des Laserstrahls auf dem Kamerasensor hervorgeht. Die Position in dem Kamerabild, an welcher der Laserstrahl die Fotodiode erreichen kann, ist ebenfalls bekannt. Auf diese Weise kann, wie mit einem Autokollimator, die Verkippung des Laserstrahls bezüglich der horizontalen Wasseroberfläche eingestellt werden.

Das Positionierungssystem besteht aus drei Lineartischen M-MTM100PE1 (*Newport Corporation, Irvine, USA*), die von Schrittmotoren angetrieben werden. Diese wurden zu einem X-Y-Z-System kombiniert. Jede Achse hat eine spezifizierte Positioniergenauigkeit von $3\text{ }\mu\text{m}$. Die Ansteuerung der Achsen erfolgt über die ESP301 Steuerung, ebenfalls vom Hersteller *Newport*. Mit dem Positionierungssystem wird der Tank mit dem Ultraschallwandler relativ zu dem feststehenden Vibrometer bewegt.

Der Tank besitzt 3 höhenverstellbare Füße, mit der der Tank horizontal ausgerichtet wird. So wird die Achse des Ultraschallwandlers gegenüber der Wasseroberfläche ausgerichtet. Damit wird erreicht, dass das Schallfeld senkrecht auf die Wasseroberfläche auftritt und parallel zu der Laserstrahlrichtung verläuft.

3.6. Folie und Folienhalterung

Für die Messung mit dem Vibrometer wird eine $0,9\text{ }\mu\text{m}$ Folie aus Polyethylenterephthalat (PET) verwendet, die auf der Wasseroberfläche aufliegt. Diese Folie wurde mechanisch gespannt und faltenfrei auf einen Tubus aufgeklebt. Anschließend wurde eine 50 nm dicke Schicht aus Aluminium thermisch aufgedampft. In Abbildung 3.6 ist der Aufbau der Folie skizziert. Daraus ist die Lage der einzelnen Schichten im Betrieb ersichtlich.

Die Folie besitzt für die Ultraschallwelle abweichende Reflexionseigenschaften im Vergleich zur Wasseroberfläche. Dementsprechend ist es notwendig, einen entsprechenden Korrekturfaktor zu ermitteln. Weiteres dazu in Abschnitt 4.5. Dieser Korrekturfaktor wurde anhand der physikalischen Eigenschaften der Folie, des Aluminiums und des Wassers berechnet.

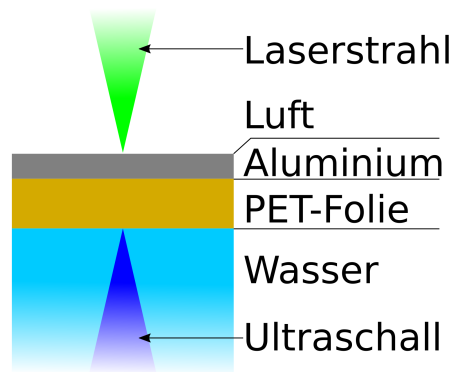


Abbildung 3.6.: Schematischer Aufbau der Folie. Die Ultraschallwelle breitet sich im Wasser aus und wird an der Folie reflektiert. Der Laserstrahl breitet sich in der Luft aus. Auf der Luftseite befindet sich eine Aluminiumschicht, die als Reflektor für die Laserstrahlung dient. Die Darstellung ist nicht maßstabsgerecht.

Der Tubus selbst befindet sich in einer weiteren Halterung, die am Mikroskopobjektiv des Vibrometers befestigt ist. Diese ist in Abbildung 3.2 zu erkennen. Zur Fokussierung des Laserstrahls auf die Folie lässt sich durch Drehung des Unterteils der Abstand der Folie ändern.

3.7. Hydrophonhalterung

Die Hydrophonhalterung ist in Abbildung 3.7 gezeigt. Diese nimmt das Hydrophon während der Messung auf. Nach dem Einsetzen der Halterung lässt sich der Winkel zwischen Hydrophonachse und Schallfeldachse über Rändelschrauben einstellen. Die Hydrophonhalterung ist für die Aufnahme von Hydrophonen mit einem Durchmesser von 130 mm konzipiert. Dieser Durchmesser entspricht dem Durchmesser von Membranhydrophonen des Herstellers Marconi. Auch die Eigenentwicklungen von Hydrophonen der PTB und den daraus hervorgegangenen Produkten der GAMPT mbH orientieren sich an diesem Durchmesser. Die Bauhöhe der Hydrophone kann zwischen 12 mm und 50 mm liegen. Hydrophone, die von diesen Maßen abweichen, müssen mit individuellen Halterungen oder unter Verwendung von Adapterringen befestigt und ausgerichtet werden.

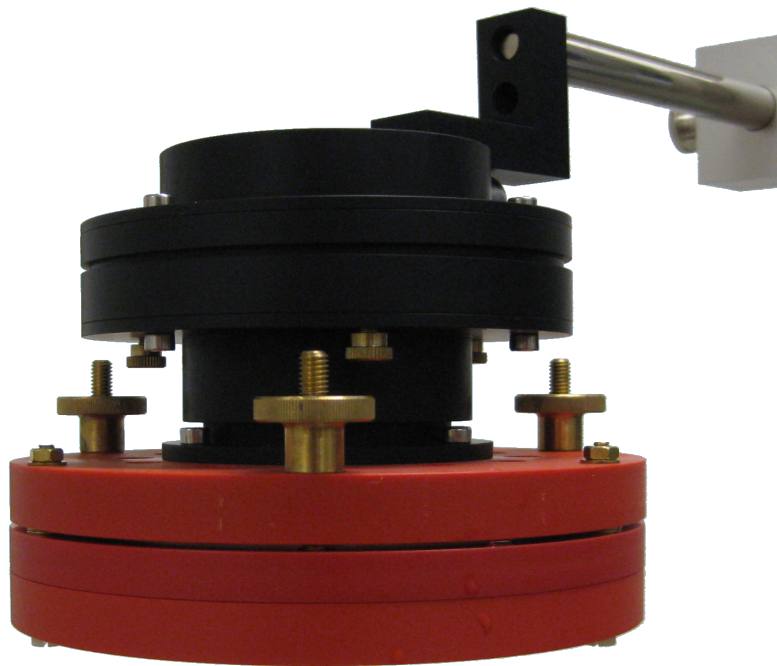


Abbildung 3.7.: Hydrophonhalterung für die Befestigung von Membranhydrophone mit einem Durchmesser von 130 mm.

3.8. 3D-gedruckte Halterung

Eine Schwierigkeit bei der zuvor beschriebenen Hydrophonhalterung ist, dass die Ausrichtung des Hydrophons manuell erfolgt. Daher war die Überlegung, die horizontale Verkipfung des Hydrophons unter Verwendung von Schrittmotoren zu realisieren, da die Motoren später automatisiert vom Rechner angesteuert werden können. Die erste Herausforderung war dabei, alle Funktionen in dem beengten Raum zwischen Vibrometer, Wasseroberfläche und der Wandung des Tanks unterzubringen. Idealerweise besitzt die Halterung eine Bauhöhe von weniger als 95 mm. Das entspricht der Abgleichlänge des Objektives, also der Abstand zwischen der Fokusebene und dem Vibrometergehäuse. Ist die Bauhöhe geringer, so lässt sich die Halterung auch für die Befestigung und Ausrichtung der Folie bei der Vibrometermessung einsetzen, da es möglich ist, den Laserstrahl auf der Oberfläche der Folie zu fokussieren.

Gleichzeit soll die Halterung in der Lage sein, verschiedenen Hydrophontypen aufzunehmen. Daher hat es sich angeboten die Halterung mittels 3D Druckverfahren zu realisieren, da sich dadurch die Einzelkomponenten innerhalb von

wenigen Stunden beliebig fertigen lassen. Individuelle Lösungen für andere Hydrophontypen lassen sich ebenfalls schnell umsetzen.

Als Winkelbereich für die Verkipfung gegenüber der Horizontalen genügen $\pm 2^\circ$. Größere Abweichungen sind bereits mit dem bloßen Auge erkennbar und lassen sich bereits durch eine sorgfältige Montage korrigieren.

Eine Fotografie der Realisierung ist in Abbildung 3.8 gezeigt. Die Konstruktion wurde als Parallelkinematik ausgeführt. Die Gelenke wurde als Festkörpergelenke ausgeführt, die direkt mit dem 3D Druck realisiert wurden. Die Schrittmotoren sind mit jeweils einem Drehgelenk mit dem oberen feststehenden Teil verbunden. Die Motoren besitzen eine Gewindespindel, die in das in einen Stab eingebrachte Gewinde greift. Am unteren Ende des Stabes befindet sich eine Verjüngung, die als Kreuzgelenk wirkt. Durch Drehung der Gewindespindel mittels des Motors wird die Länge des Stabs verändert, was zu einer Verkipfung des unteren Ringes führt.

Der Vorteil der 3D-gedruckten Halterung ist, dass sie filigran und leicht ausgeführt werden konnte. Dadurch konnte eine leichtere Handhabung und eine bessere Zugänglichkeit bei dem Einbau des Hydrophons in den Wassertank erreicht werden. Als verbesserungswürdig ist die mechanische Steifigkeit anzusehen, die bedingt durch die einfache Konstruktion und das Streben nach geringen Materialeinsatz, geringer ist im Vergleich zu der Hydrophonhalterung aus Abschnitt 3.7. Da durch das Hydrophon während der Messung keine dynamischen Belastungen auftreten, ist die Konstruktion hinsichtlich ihrer Stabilität dennoch ausreichend und kann für die Messung eingesetzt werden. Zusammenfassend bleibt zu sagen, dass mittels 3D-Druck individuelle Halterungen in kurzer Zeit realisiert werden können und dass auch jederzeit Ersatzteile nachgefertigt werden können.

3.9. Temperierung des Wassers

Bei der Kalibrierung von Hydrophonen spielt die Temperatur eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Zunächst ist die Empfindlichkeit des Hydrophons temperaturabhängig, da der Piezoeffekt auf dem das Messprinzip beruht eine Temperaturabhängigkeit aufweist. Die Norm für die Kalibrierung von Hydrophone (IEC 62127) [38] fordert daher, dass die Kalibrierung von Hydrophonen bei einer Wassertemperatur von 19°C bis 21°C erfolgt. Des Weiteren ändert sich mit der

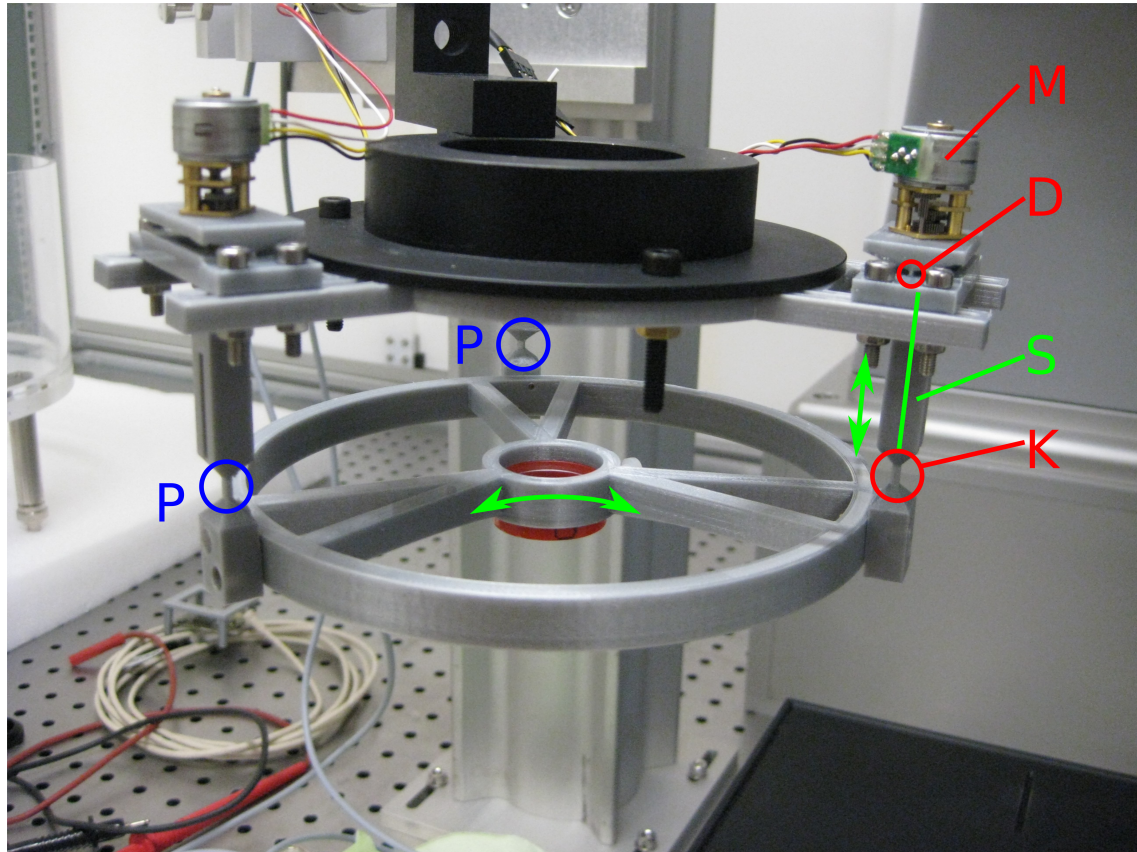


Abbildung 3.8.: Mittels 3D-Druck realisierte Halterung, hier konfiguriert für die Halterung der Folie. Das Drehgelenk (D) und Kreuzgelenk (K) sind über einen Stab (S) verbunden. Durch Antrieb des Motors (M) lässt sich die Länge des Stabs verändern, was zu einer Verkipfung des unteren Rings führt. Die Achse, um die die Kippung erfolgt, ist dabei durch die beiden Kreuzgelenke in den Punkten (P) festgelegt.

Temperatur auch die Schallgeschwindigkeit im Wasser, wodurch bei konstanten Abstand zwischen Ultraschallwandler und Hydrophon die Signallaufzeit beeinflusst wird. Dies hat gleichzeitig auch eine Änderung des Schallfeldes zur Folge, da sich die Wellenlänge der Ultraschallwelle ändert. Bei der Impulsanregung ist außerdem zu beachten, dass die Nichtlinearität der Schallausbreitung in Wasser temperaturabhängig ist. Dies führt dazu, dass sich die spektrale und räumliche Signalverteilung des Impulses mit der Temperatur ändert.

Da die Kalibrierung der Hydrophone in zwei Schritten erfolgt, die mit einem gewissen zeitlichen Versatz durchgeführt werden, muss gewährleistet sein, dass sich die Wassertemperatur in der Zwischenzeit nach Möglichkeiten nicht ändert. Die Messung wird daher in einem mit einer Raumklimaanlage ausgestatteten Laborraum durchgeführt. Dadurch konnte die Wassertemperatur über Zeiträume von einigen Stunden nur auf $\pm 0,5^\circ\text{C}$ konstant gehalten werden.

Für die Kalibrierung wird zudem eine kleine Wassermenge von zirka 3 L verwendet, die entsprechend schnell ihre Temperatur ändern kann. Um trotzdem die Temperatur des Wassers auch über längere Zeiträume präzise einzustellen und konstant zu halten, wird ein Umwälzkühler (*Julabo F12-MA Kälte-Umwälzthermostat*) mit einer Edelstahl-Kühlschlange zur aktiven Temperierung des Wassers verwendet. Die Kühlschlange besteht aus 5 m Edelstahlwellrohr und befindet sich im Messtank und wird mit auf 20°C temperiertem Wasser durchflossen. Das Reinstwasser im Messtank wird durch eine Miniaturpumpe umgewälzt, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erhalten. Dabei ist die Geschwindigkeit der Pumpen abzuwägen, da einerseits eine höhere Förderrate zu einer besseren Durchmischung führt, andererseits Strömungen im Bereich des Schallfeldes sowie durch Wasserbewegungen verursachte Auslenkungen der Folie beziehungsweise der Hydrophonmembran die Messung stören. Mit dem Kühlsystem ist es möglich, die Temperatur auf $\pm 50\text{ mK}$ konstant zu halten. Die Auswirkungen der Temperatur auf die Unsicherheit werden später in Abschnitt 4.10 genauer behandelt.

3.10. Chemische und physikalische Eigenschaften des Wassers

Für die Messungen wird entmineralisiertes und entgastes Wasser verwendet, welches bis zur Verwendung in einem Behälter unter verringertem Luftdruck und bei Raumtemperatur gelagert wird. Die Wassertemperatur hat einen Einfluss auf die Messung. Um dies zu überwachen, wird die Temperatur während der Messung automatisch aufgezeichnet. Dazu wird ein PT100 Widerstandsthermometer und ein Keithley 2700 Multimeter (*Keithley Instruments, Cleveland, USA*) verwendet. Zusätzlich wird die Lufttemperatur über ein weiteres PT100 Thermometer und ein weiteres Keithley 2700 Multimeter erfasst, um Temperaturschwankungen in der Nähe des Messortes detektieren zu können.

Vor und nach jeder Messung wird die Leitfähigkeit mit dem Handmessgerät WTW Cond 315i (*WTW inzwischen Xylem, Rye Brook, USA*) erfasst und in das Messprotokoll übernommen. Die Leitfähigkeit ist besonders bei der Hydrophonmessung kritisch. Bei der Mehrzahl der Hydrophone sind die Kontaktierungen des sensitiven Elementes mit unisolierten Metallelektroden realisiert. Das Wasser ist somit ein parasitärer komplexwertiger Widerstand, der die Hydrophonspannung beeinflusst.

Eine weitere Messung betrifft den Restsauerstoffgehalt des Wassers. Dieser wird ebenfalls mit einem Handmessgerät HQ30d (*HACH, Loveland, USA*) sowohl vor als auch nach jeder Messung erfasst und der Wert in das Messprotokoll übernommen.

3.11. Bestimmung von elektrischen Impedanzen

Für die Berechnung der Lastkorrektur sind die Impedanzen des Hydrophons und des Oszilloskopeingangs zu bestimmen. Falls ein Verstärker zwischen Hydrophon und Oszilloskopeingang geschaltet wird, ist entsprechend die Impedanz des Verstärkereingangs zu bestimmen.

Die Messung der Impedanz erfolgt in Reflexion mit einem Netzwerkanalysator (*8753 ET, Agilent, Santa Clara, USA*). Als Messdaten erhält man die frequenzabhängige Impedanz. Daraus wird anschließend die Lastkorrektur berechnet. Für die Berechnung siehe Abschnitt 2.4 auf Seite 11.

3.12. Software

Der Messplatz soll zukünftig für die routinemäßige Kalibrierung von Hydrophonen eingesetzt werden. Es besteht der Plan Kundenhydrophone direkt mit dem Messplatz zu kalibrieren, da die Messung nur wenig Zeit beansprucht. Daher war es das Ziel die Software für Messung und Auswertung so zu gestalten, dass eine weitestgehende Automatisierung sowohl der Messdatenerfassung als auch der Auswertung realisiert wurde. Dadurch wird der Bediener zukünftig entlastet und Bedienfehler reduziert. Gleichzeitig ist durch die automatische Datenübernahme und Auswertung die Gefahr, dass es zu Übertragungsfehlern der Messwerte kommt nahezu ausgeschlossen. Insgesamt wird dadurch auch Messung und Auswertung beschleunigt.

3.12.1. Messdatenerfassung

Die Software für die Datenerfassung wurde mit Visual Basic .NET realisiert. Mit Visual Basic ist eine problemlose Kommunikation mit der Vibrometersoftware möglich. Bei der Entwicklung wurde Wert daraufgelegt, dass die Software möglichst modular aufgebaut ist. Dadurch wird die einfache Austauschbarkeit unterschiedlicher Messgeräte gewährleistet und es können weitere Messgeräte zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt werden.

Die Messprozeduren können individuell zusammengestellt werden. Der Anwender hat somit die Möglichkeit, den Ablauf der einzelnen Messungen anzupassen. Dies schließt beispielsweise die Einstellung der Anzahl der Wiederholungen mit ein. Der Ablauf der Messung wird in einer XML-Datei protokolliert, die in der anschließenden Auswertung als Ausgangspunkt dient. Des Weiteren kann die XML-Datei mit der Software auch wieder geladen werden und als Vorlage für weitere Messungen eingesetzt werden.

Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung der Software findet sich im Anhang B.

3.12.2. Auswertung der Ergebnisse

Für die Auswertung wird die freie Software *Scilab* verwendet. Diese ist in der Arbeitsweise vergleichbar mit *Matlab*. Die Auswertung erfolgt mehrstufig. Der Ablauf ist in Abbildung 3.10 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt werden

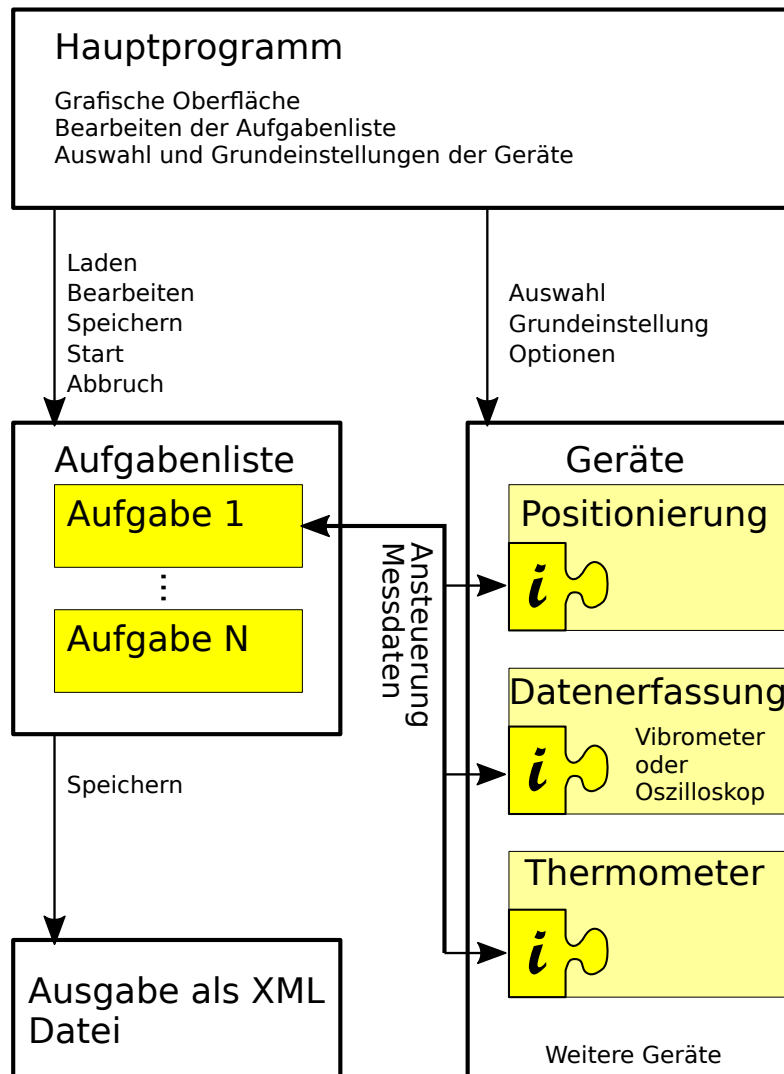


Abbildung 3.9.: Schematischer Aufbau der Software. Das Hauptprogramm übernimmt die Konfiguration der Aufgabenliste und legt die verwendeten Geräte und deren Grundeinstellungen fest. Anschließend wird die Aufgabenliste abgearbeitet und die entsprechenden Schritte ausgeführt. Dabei wird über eine für jede Geräteart definierte Schnittstelle kommuniziert. Dadurch lassen sich Geräte einfach austauschen und die Aufgabenliste ist unabhängig von den verwendeten Geräten. Nach jedem Messschritt wird der aktuelle Zustand der Aufgabenliste mit allen bisher aufgelaufenen Ergebnissen in einer XML-Datei für die spätere Auswertung abgespeichert.

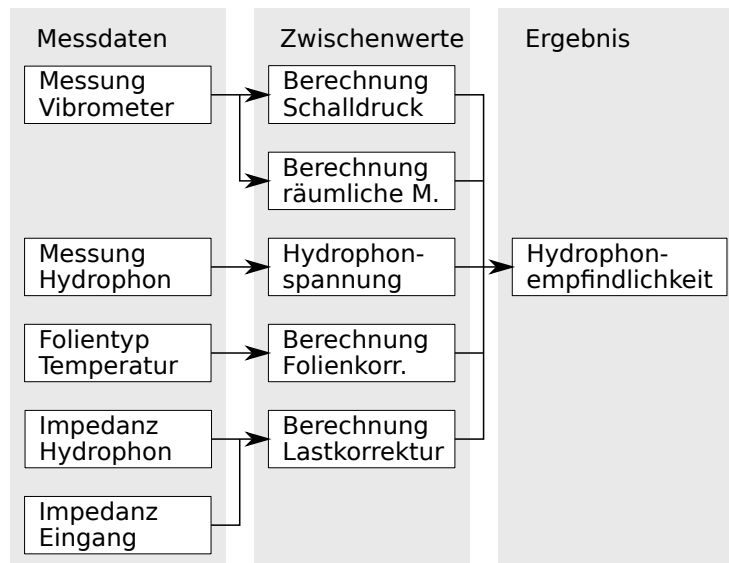


Abbildung 3.10.: Ablauf der Auswertung. Aus den Messdaten werden zunächst die in der mittleren Spalte genannten Zwischenwerte berechnet. Anschließend wird daraus die Hydrophonempfindlichkeit bestimmt.

aus den Messdaten die relevanten Größen extrahiert und Zwischenwerte berechnet sowie abgespeichert. Die Zwischenwerte sind dabei der frequenzabhängige Schalldruck gemessen mit dem Vibrometer, die frequenzabhängige Hydrophonspannung, die Korrektur für die Folie und die Korrektur der räumlichen Mittelung. Anschließend werden aus diesen Daten die Hydrophonempfindlichkeit ermittelt. Der letzte Schritt besteht darin, mehrere Resultate der Hydrophonempfindlichkeit für unterschiedliche Messungen zu mitteln und abzuspeichern. In jedem Schritt wird zur Dokumentation eine Protokolldatei im PDF-Format angelegt.

4. Korrekturgrößen und Unsicherheitsbudget für den Messaufbau

Mit dem Messaufbau wird die Auslenkung der Wasseroberfläche und die Hydrophonspannung ermittelt und daraus die Hydrophonempfindlichkeit berechnet. Diese Messdaten sind mit einer Unsicherheit behaftet. Im weiteren Verlauf der Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit werden weitere Korrekturgrößen bestimmt, die ebenfalls unsicherheitsbehaftet sind. All diese Beiträge gehen in das Gesamtunsicherheitsbudget der Hydrophonkalibrierung ein. Zunächst wird ein Überblick über die einzelnen Einflussgrößen zusammengetragen. Deren individuelle Beiträge zu dem Unsicherheitsbudget werden dann im Anschluss dargelegt und eingehend untersucht. Dieses Kapitel umfasst im Wesentlichen die Ergebnisse der Veröffentlichungen [39, 40, 41] mit einigen Ergänzungen. Die im Folgenden betrachteten Unsicherheitsbeiträge sind:

- Die sich aus dem Fotodiodenfrequenzgang ergebende Unsicherheit, genauer, der nach der Korrektur des Amplitudengangs des Oszilloskops verbleibende Frequenzgang zwischen dem optischen Trägersignal und dem digitalisierten elektrischen Spannungssignal. Dabei ist die Auswirkung des Frequenzgangs auf die Messung der Folienauslenkung entscheidend.
- Die Unsicherheit aufgrund des Einflusses der Gouy-Phase auf die optische Längenmessung mit dem Vibrometer.
- Der Unsicherheitsbeitrag bedingt durch das Rauschen bei der Messung mit dem Vibrometer.
- Die Unsicherheit in der Messung der Hydrophonspannung mit dem Oszilloskop. Dabei wird die verbleibende Unsicherheit nach der Korrektur des Oszilloskopfrequenzgangs eingeschlossen. Die Unsicherheit bezieht

sich auf die Übertragungsfunktion zwischen der am Eingang anliegenden Spannung und dem ausgegebenen numerischen Wert. Die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Oszilloskops für die absolute Spannungsmessung erfolgte mit einem rückgeführten Frequenzgenerator.

- Die Rauschspannungsamplitude bei der Hydrophonmessung. In der Rauschspannung ist ebenfalls das Quantisierungsrauschen des Analog-Digital-Wandlers enthalten. Das Quantisierungsrauschen steht im Bezug zu der diskreten Spannungsauflösung des Wandlers.
- Die Unsicherheit bezüglich der Berechnung der Transmissionseigenschaften der Folie für die Folienkorrektur.
- Die Unsicherheit bezüglich der Positionierung im Schallfeldmaximum in der x-y-Ebene für die Vibrometermessung sowie Hydrophonmessung. Die Berechnung des Unsicherheitsbeitrags erfolgte im Zusammenhang mit der Berechnung der räumlichen Mittelung, da beides von dem Schallfeldprofil und dem Hydrophondurchmesser abhängt.
- Die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der räumlichen Mittelungskorrektur. In diese gehen die Unsicherheiten für die Positionierung im Schallfeldmaximum in der x-y-Ebene bei der Vibrometer- und bei der Hydrophonmessung, sowie die Unsicherheit des effektiven Hydrophonradius ein.
- Die Unsicherheit bedingt durch die endliche Reproduzierbarkeit des Ultraschallfeldes. In diese Unsicherheit gehen die Reproduzierbarkeit der Spannung am Wandler und die Reproduzierbarkeit des z-Abstandes ein.
- Die Unsicherheit in der Reproduzierbarkeit des Schallfeldes bedingt durch Temperaturänderungen des Wassers sowie Änderungen des Wandlers und Impulsgenerators während der Messungen.

Die zuvor genannte Aufzählung gilt für die Kalibrierung von Hydrophonen mit eingebauten Verstärker und 50 Ω -Ausgang an einem mit 50 Ω abgeschlossenen Oszilloskopeingang. Diese Vorgehensweise wird auch angewendet, wenn das Hydrophon einen externen Verstärker benötigt, aber das Gesamtsystem aus Verstärker und Hydrophon charakterisiert werden soll.

Bei der Ermittlung der Hydrophonempfindlichkeit von passiven Hydrophonen wird zusätzlich der Korrekturfaktor für die Bestimmung der Open-Circuit Spannung am Kabelende benötigt. Dieser wird aus der Impedanz des Hydrophons und der Lastimpedanz berechnet. In diesem Fall werden folgende Unsicherheiten zusätzlich in die Berechnung einbezogen:

- Die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der Eingangsimpedanz des Oszilloskops.
- Die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der Quellenimpedanz des Hydrophons.

Wird bei der Messung ein externer Verstärker verwendet, finden stattdessen folgende Unsicherheitsbeiträge Berücksichtigung:

- Die Unsicherheit aus der Bestimmung des Verstärkungsfaktors.
- Die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der Eingangsimpedanz des Verstärkers.
- Die Unsicherheit bezüglich der Bestimmung der Hydrophonimpedanz.

4.1. Frequenzgang der Fotodiode und dessen Auswirkung auf die gemessene Auslenkung

Die Fotodiode setzt das phasenmodulierte optische Signal in ein elektrisches Signal um. Im Idealfall wird dies durch einen frequenzunabhängigen Übertragungsfaktor zwischen der Lichtintensität und dem elektrischen Fotostrom beschrieben. Reale Fotodioden und die nachfolgende elektrische Verarbeitungskette besitzen jedoch einen Frequenzgang. Dieser Frequenzgang beeinflusst die einzelnen spektralen Komponenten des Signals individuell. Die anschließende Demodulation liefert, infolge der Veränderungen des Spektrums, ein abweichendes Signal.

Bei einer sinusförmigen Modulation der optischen Phase mit endlichem Phasenhub entstehen im Trägersignalspektrum Seitenbänder höherer Ordnungen. Durch den Frequenzgang der Fotodiode werden nun die einzelnen Bänder unterschiedlich in das elektrische Signal umgesetzt. Bei der anschließenden Demodulation des elektrischen Signals ergeben sich Abweichungen im Vergleich zu dem

optischen Signal. Abhängig vom Frequenzgang der Fotodiode kann es zu Abweichungen sowohl in der Amplitude als auch in der Phase kommen und zusätzlich können auch Signale bei Vielfachen der Signalfrequenz erscheinen. Bei breitbandigen Signalen mit hohem Phasenhub sind die Verhältnisse noch unübersichtlicher, da sich die Seitenbänder unterschiedlicher Ordnung überlagern.

Um den Einfluss der Fotodiodenkennlinie auf das Signal zu untersuchen, wurde zunächst der Frequenzgang der Fotodiode durch Anregung mit einem Femtosekundenpuls laser ermittelt. Anschließend wurde aus der Übertragungsfunktion der Unsicherheitsbeitrag bezüglich des demodulierten Vibrometersignals mittels Simulation abgeschätzt.

4.1.1. Bestimmung des Fotodiodenfrequenzgangs mit einem fs-Laser

Die Bestimmung des Fotodiodenfrequenzgangs erfolgte mit dem von Winter et al. [32] beschriebenen Verfahren. Dazu wurde das Vibrometer geöffnet und durch Einbringen eines Spiegels der Laserstrahl des Femtosekundenlasers auf die Fotodiode gerichtet. Der verwendete Laser besaß eine mittlere Wellenlänge von 810 nm, eine Repetitionsrate von 76 MHz und eine Pulsbreite von 80 fs. Für einen solchen Impuls ändert sich in einem Frequenzbereich von 0 bis 5 GHz die spektrale Amplitude um weniger als 0,002 %. Durch die Repetitionsrate von 76 MHz ergab sich ein Abstand der auswertbaren Frequenzpunkte von ebenfalls 76 MHz.

Das Vibrometer war über das zugehörige Verbindungskabel mit dem Oszilloskop verbunden. Der Amplitudengang des Oszilloskops zusammen mit dem Verbindungskabel wurde von Polytec in einer Werkskalibrierung ermittelt. Diese Kalibrierdaten wurden, wie auch in den späteren Messungen mit der Vibrometersoftware, zur Signalkorrektur verwendet. Die verbleibenden Abweichungen des Frequenzgangs wurden der Fotodiode zugeschrieben.

Das Ergebnis für die Übertragungsfunktion der Fotodiode ist in Abbildung 4.1 für Amplitude und Phase gezeigt. In dem Diagramm sind die Lage der Trägerfrequenz des Vibrometersignals bei 618 MHz sowie die dazu symmetrische Lage der Seitenbänder markiert, um den für die Übertragung relevanten Frequenzbereich grafisch zu visualisieren. Die Amplitude wurde auf den Datenpunkt bei 608 MHz normiert, welcher der Trägerfrequenz von 618 MHz am nächsten war. In dem für die Signalübertragung relevanten Intervall von 76 MHz bis 1,2 GHz wich die

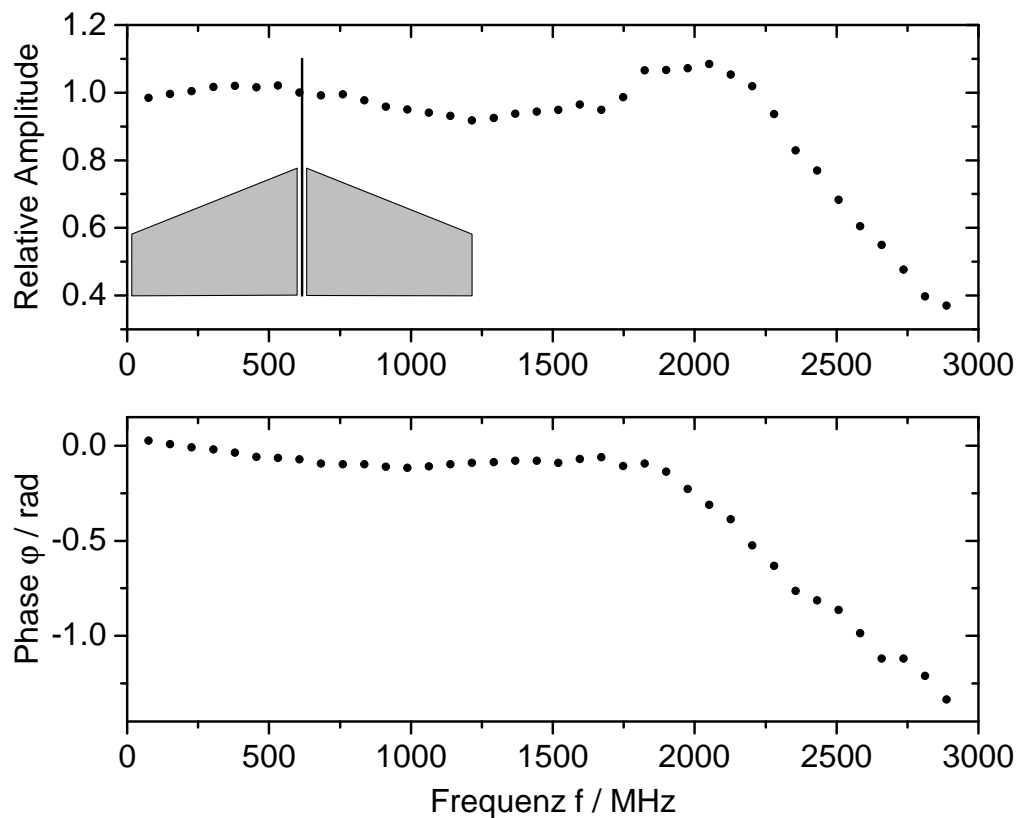


Abbildung 4.1.: Übertragungsfunktion der Fotodiode bis 3000 MHz. Die in das obere Diagramm eingefügte Skizze gibt den für den Betrieb des Vibrometers notwendigen Frequenzbereich an.

normierte Amplitude um weniger als $\pm 7\%$ von eins ab. Oberhalb einer Frequenz von 2,2 GHz fällt die Kennlinie ab. Dieser Abfall ist durch die Grenzfrequenz des Oszilloskopeingangs bedingt. Das Oszilloskop besitzt eine nominelle Bandbreite von 2,5 GHz. Für die Messung mit dem Vibrometer ist dieser Abfall jedoch unkritisch, da die maximale Frequenz für das Trägersignal bei 1,2 GHz liegt.

Der Phasengang ist glatt. Bis zu einer Frequenz von 1,7 GHz ändert sich die Phase um maximal 0,12 rad. Im höheren Frequenzbereich fällt die Phase dann ab. Wie bereits bei der Amplitude ausgeführt, ist dies für die Funktion des Vibrometers aber unkritisch.

4.1.2. Simulation der Abweichung für einen Ultraschallimpuls

Bei den verwendeten impulsförmigen Ultraschallsignalen handelt es sich um breitbandige Signale mit einer großen Schalldruckamplitude. Damit ist eine Auslenkung der Wasseroberfläche von 120 nm erreichbar, was einem Phasenhub von $\Delta\varphi \approx 3$ rad entspricht. Somit tragen die Seitenbänder höherer Ordnung zur Signalübertragung einen wesentlichen Anteil bei. Seitenbänder unterschiedlicher Ordnung überlagern sich dabei. Gleichzeitig besitzt der Ultraschallimpuls ein charakteristisches Spektrum (vergleiche Abbildung 3.4 auf Seite 34), welches zu hohen Frequenzen hin abfällt. Der Frequenzgang der Fotodiode beeinflusst das Trägersignalspektrum, welches symmetrisch zu 618 MHz lokalisiert ist. Die Abweichung der gemessenen Auslenkung wird jedoch erst nach der Demodulation in dem niederfrequenten Basisbandsignal sichtbar.

Um den Unsicherheitsbeitrag abzuschätzen, wurde eine numerische Simulation durchgeführt. Das gemessene Impulssignal wurde für die Simulation verwendet, indem es auf verschiedene Spitzenamplituden skaliert wurde. Die Spitzenamplitude ist direkt proportional zum Phasenhub. Das Signal wurde auf die Trägerfrequenz von 618 MHz aufmoduliert. Anschließend wurde dieses Signal mit dem Fotodiodenfrequenzgang gefiltert und demoduliert. Durch spektralen Vergleich zwischen dem Ursprungssignal und dem demodulierten Signal wurde die relative Abweichung abgeschätzt. Die Simulation wurde für unterschiedliche Phasenhübe durchgeführt, um die Auswirkung einer veränderten Signalamplitude abzuschätzen. Weitergehende Beschreibungen dazu finden sich ebenfalls in [41].

In Abbildung 4.2 ist die relative Änderung in der Amplitude und in Abbildung 4.3 die Änderung in der Phase für verschiedene Phasenhübe dargestellt. Für kleine Auslenkungen ergab sich ein Verlauf vergleichbar mit dem Ergebnis, das man direkt aus der Fotodiodenkennlinie berechnen kann und wie es auch in [32] ermittelt wurde. Die Übertragungsfunktion ist glatt und ergibt sich, unabhängig vom verwendeten Signal, alleine aus der Fotodiodenkennlinie. Dies lässt sich damit erklären, dass nur das Seitenband erster Ordnung die Information trägt. Höhere Seitenbänder liefern keinen Beitrag. Dementsprechend überlagern sich keine Seitenbänder unterschiedlicher Ordnungen.

Mit steigendem Phasenhub nehmen der Beitrag und die Anzahl höherer Seitenbänder zu, welche sich gegenseitig überlagern. Im Ergebnis hat die Überlagerung zur Folge, dass die Struktur des Spektrums des Ultraschallsignals in der Über-

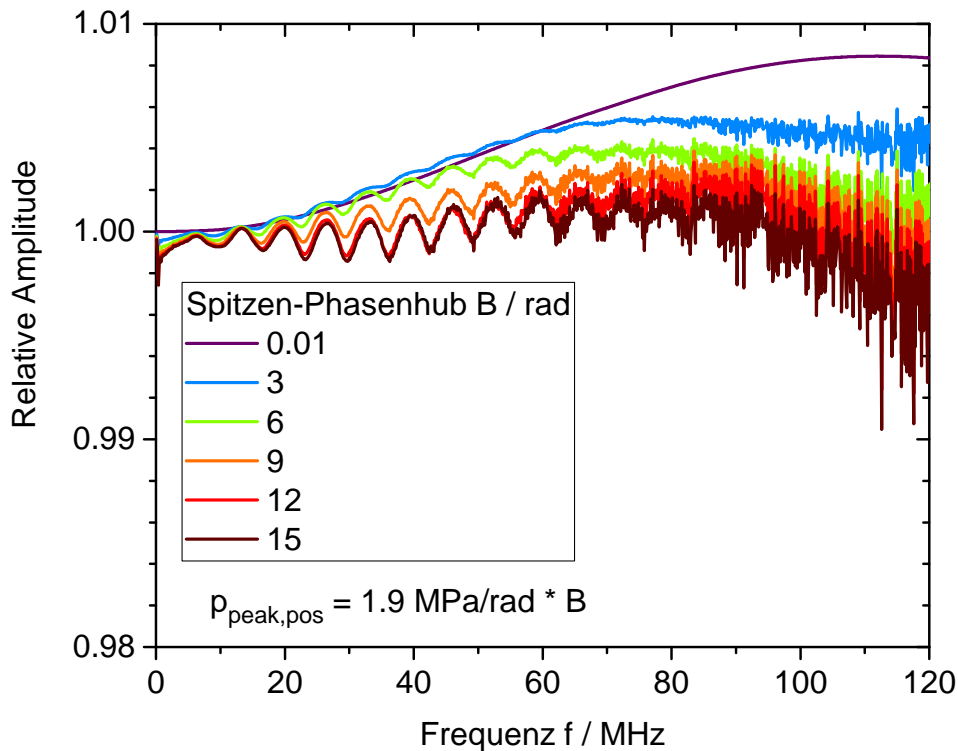


Abbildung 4.2.: Relative Änderung der Amplitude bezogen auf das für die Simulation verwendete Ursprungssignal. Die Spitzenamplitude des Ursprungssignals wurde auf den in der Legende angegebenen Phasenhub skaliert. Die Beziehung zwischen dem Phasenhub und dem Spitzenüberdruck für den verwendeten Impuls ist ebenfalls aus dem Diagramm ersichtlich.

tragungsfunktion sichtbar wurde. Insgesamt ergab sich aus der Simulation, dass die Abweichung in einem Frequenzbereich bis 120 MHz bei unter 0,8 % liegt. Der Wert wird als Schranke für den Unsicherheitsbeitrag verwendet. Der Beitrag ist, verglichen mit anderen Unsicherheitsbeiträgen, gering, sodass keine Korrektur des Einflusses der Fotodiodenkennlinie vorgenommen wird.

Die Phasenabweichung, gezeigt in Abbildung 4.3, ist mit einem Wert von weniger als 6 mrad gering. Mit steigendem Phasenhub nimmt die Abweichung ab, was vorteilhaft ist, da sich so der Fehler reduziert. Die Unsicherheit wird in Form einer Schranke mit $\pm 6 \text{ mrad}$ abgeschätzt.

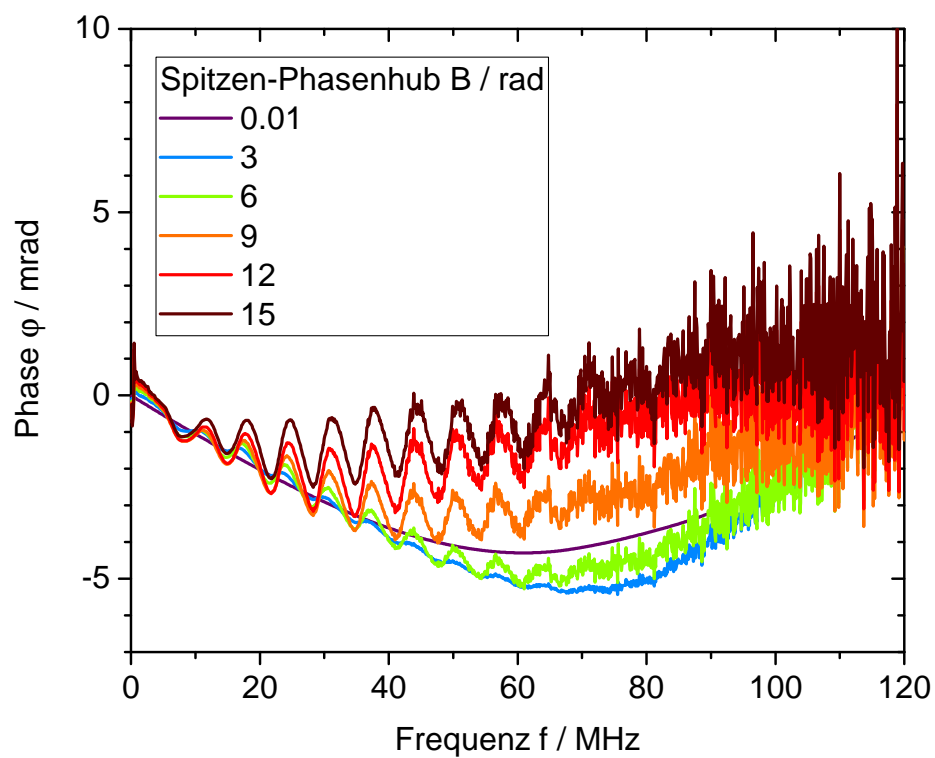


Abbildung 4.3.: Relative Änderung der Phase bezogen auf das Ursprungssignal.
Die Phasenhübe sind analog zu Abbildung 4.2.

4.2. Einfluss des Mikroskopobjektivs

Bei der Messung mit dem Vibrometer wird ein Mikroskopobjektiv zur Fokussierung des Laserstrahls auf der Folie verwendet. Durch die Fokussierung wird ein kleiner Durchmesser des Lichtflecks auf der Folie erreicht. Bei der Fokussierung tritt der Effekt der Gouy-Phase (vergleiche Abschnitt 2.10 auf Seite 22) auf, wodurch die gemessene Auslenkung geringer erscheint [29, 33].

Der Unsicherheitsbeitrag wurde für das verwendete Objektiv, das eine Vergrößerung von 3,6 besitzt, abgeschätzt. Für die Berechnung wurden folgende Werte verwendet:

Wellenlänge	$\lambda = 532 \text{ nm}$
Brennweite	$f = 55,5 \text{ mm}$
Strahldurchmesser	$d = 4 \text{ mm}$

$$\xi_m(t) = \left(1 - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{z_R}{z^2 + z_R^2}\right) \xi(t) \quad (4.1)$$

$$z_R = \frac{4\lambda}{\pi} \frac{f^2}{d^2} \quad (4.2)$$

Die Berechnung ergab eine Abweichung zwischen der gemessenen Auslenkung $\xi_m(t)$ und der tatsächlichen Auslenkung der Folie $\xi(t)$ im Fokus des Objektivs ($z \approx 0$) zu

$$\xi_m(t) = 0,999 \xi(t) \quad (4.3)$$

Die Abweichung beträgt rechnerisch somit maximal 0,1 %. Untersuchungen von Rembe und Dräbenstedt [29, 33] haben gezeigt, dass die reale Abweichung noch geringer ist. Im Vergleich zu anderen Unsicherheiten ist sie klein. In der Auswertung wird daher keine Korrektur der Messwerte durchgeführt. Die berechnete Abweichung wird als obere Schranke für die Unsicherheit verwendet.

4.3. Einfluss des Rauschens bei der Messung mit dem Vibrometer

Einen weiteren Unsicherheitsbeitrag liefert das Signalrauschen der Wegamplitude während der Vibrometermessung. Um den Einfluss des Rauschens zu bestimmen, wird eine Messung mit dem Vibrometer ausgeführt, ohne dass ein Ultraschallsignal ausgesendet wurde. Die übrigen Einstellungen, insbesondere die Anzahl

der Mittelungen und die Länge des Messintervalls, sind die Gleichen, wie bei der Messung eines Ultraschallsignals mit dem Vibrometer, um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Von diesem Messergebnis wird durch Fouriertransformation das Spektrum ermittelt. Der Unsicherheitsbeitrag wird durch Berechnung des quadratischen Mittelwertes der spektralen Wegamplitudenwerte abgeschätzt. Die Berechnung wird auf das Frequenzintervall beschränkt, in dem die Hydrophonempfindlichkeit ermittelt wird. In Abbildung 4.4 ist das typische Rauschspektrum des Vibrometers gezeigt. Bis 200 MHz liegt weißes Rauschen vor.

Der berechnete Mittelwert wird als Unsicherheitsbeitrag für den Real- sowie Imaginärteil in dem gesamten Frequenzbereich verwendet. Die Korrelation zwischen Real und Imaginärteil wird mit 0 angenommen. Diese Annahme ist plausibel, da das Rauschen keine feste Phase besitzt. Für jede Messreihe wird der Unsicherheitsbeitrag individuell berechnet. Dies ist notwendig, weil das Signal-Rausch-Verhältnis der gemessenen Auslenkung von der Signalstärke des Trägerfrequenzsignals abhängt, welches wiederum von der Fokussierung und Ausrichtung der Folie abhängig ist.

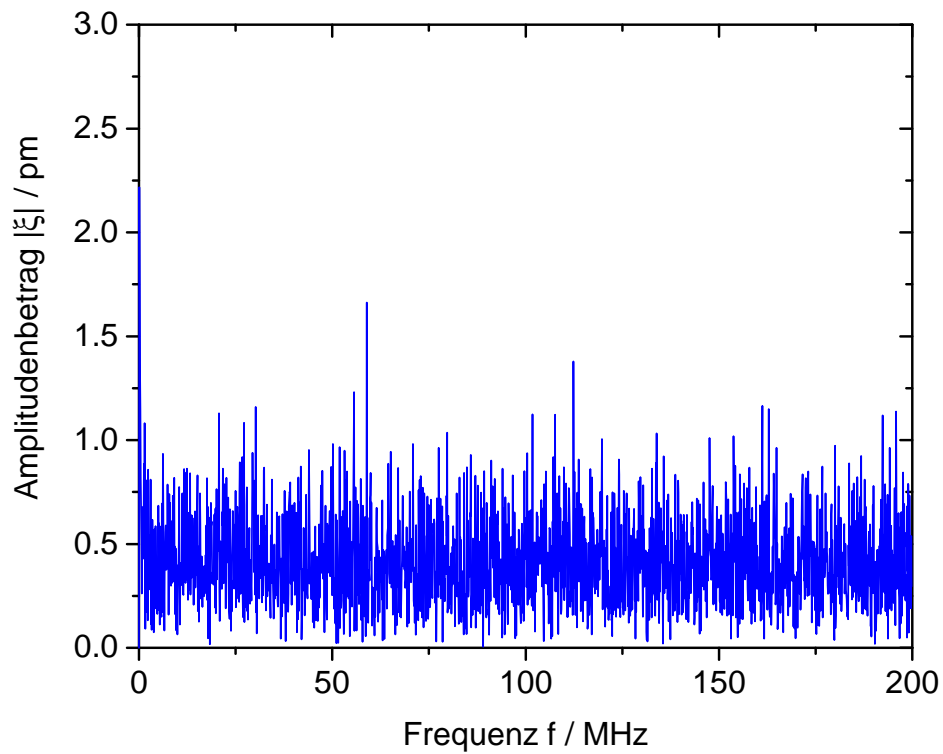


Abbildung 4.4.: Spektrum des Vibrometers, bei einer Messung ohne Ultraschallsignal. Die Messzeit betrug $10\ \mu\text{s}$ und es wurden 100 Mittelungen durchgeführt. In der Vibrometersoftware war für die Messung eine Bandbreite von 500 MHz eingestellt. Die Software legt anhand dieser Einstellungen die Anzahl der Datenpunkte auf 5000 fest. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass weißes Rauschen vorliegt.

4.4. Einfluss des Rauschens bei der Ermittlung der Hydrophonspannung

Der Beitrag des Rauschens bei der Hydrophonmessung wird durch Messung der Hydrophonspannung bei abgeschaltetem Ultraschallsignal ermittelt. Die Messdauer, Anzahl der Mittelungen und Spannungsbereich sind gleich den Einstellungen bei der Hydrophonspannungsmessung mit Ultraschallsignal. Aus dem Spektrum des Signals wird der Unsicherheitsbeitrag durch Berechnen des quadratischen Mittelwerts bestimmt. Der Unsicherheitsbeitrag enthält auch den Beitrag des Quantisierungsrauschens des Oszilloskops. Der Quantisierungsfehler, bedingt durch die endliche Auflösung des Analog-Digital-Wandlers, wird dadurch bereits berücksichtigt.

Zusätzlich wurde auch ein Sinussignal aufgezeichnet und das Spektrum mit dem Spektrum des Rauschens ohne Signal verglichen. Dadurch wurde ermittelt, ob der Rauschuntergrund von der Amplitude des Signals einen Einfluss auf die Rauschamplitude hat. Das Ergebnis war, dass das Grundrauschen konstant blieb, das heißt die Spektren unterscheiden sich außer der Spektralkomponente des Sinussignals nicht. Damit ist die Abschätzung des Rauschens anhand einer Messung ohne Signal gerechtfertigt.

4.5. Berechnung der Folienkorrektur

Die Folienkorrektur wird numerisch mithilfe der Gleichungen in Abschnitt 2.2 (Seite 8) unter Verwendung von Materialparametern berechnet. In die Berechnung gehen folgende Größen ein:

- Schallgeschwindigkeit [42] und Dichte [43] des Wassers, ermittelt aus Literaturwerten anhand der gemessenen Wassertemperatur.
- Schallgeschwindigkeit, Dichte und Dicke der Folie, welche durch Messungen bestimmt wurden.
- Schallgeschwindigkeit und Dichte der Aluminiumbeschichtung aus Literaturwerten [44].
- Dicke der Aluminiumschicht aus Messungen während des Bedampfungsprozesses.
- Schallkennimpedanz der Umgebungsluft aus Literaturwerten.

Da die Schallgeschwindigkeit und Dichte des Wassers auch für die Umrechnung von der Partikelgeschwindigkeit in den Schalldruck benötigt wird, wird der kombinierte Term $T(f)/(\rho_W c_W)$ berechnet. Dadurch wird gleichzeitig in der Unsicherheitsberechnung die Korrelation dieser Terme bezüglich einer Temperaturänderung berücksichtigt.

In Abbildung 4.5 ist das Ergebnis für die berechnete Übertragungsfunktion der PET-Folie mit der Dicke von $0,9\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt. Die Dicke der Aluminiumbeschichtung betrug 50 nm . Die Berechnung liefert komplexe Werte, die auch eine Korrektur der Phase ermöglichen. Der anfangs lineare Anstieg der Phase ist dadurch bedingt, dass der Bezugspunkt für die Phase $\varphi = 0\text{ rad}$ die Grenzfläche zwischen Wasser und Folie ist und bis zur Aluminiumbeschichtung eine zeitliche Verzögerung aufgrund der Laufzeit auftritt (vergleiche Gleichung 2.16 auf Seite 16).

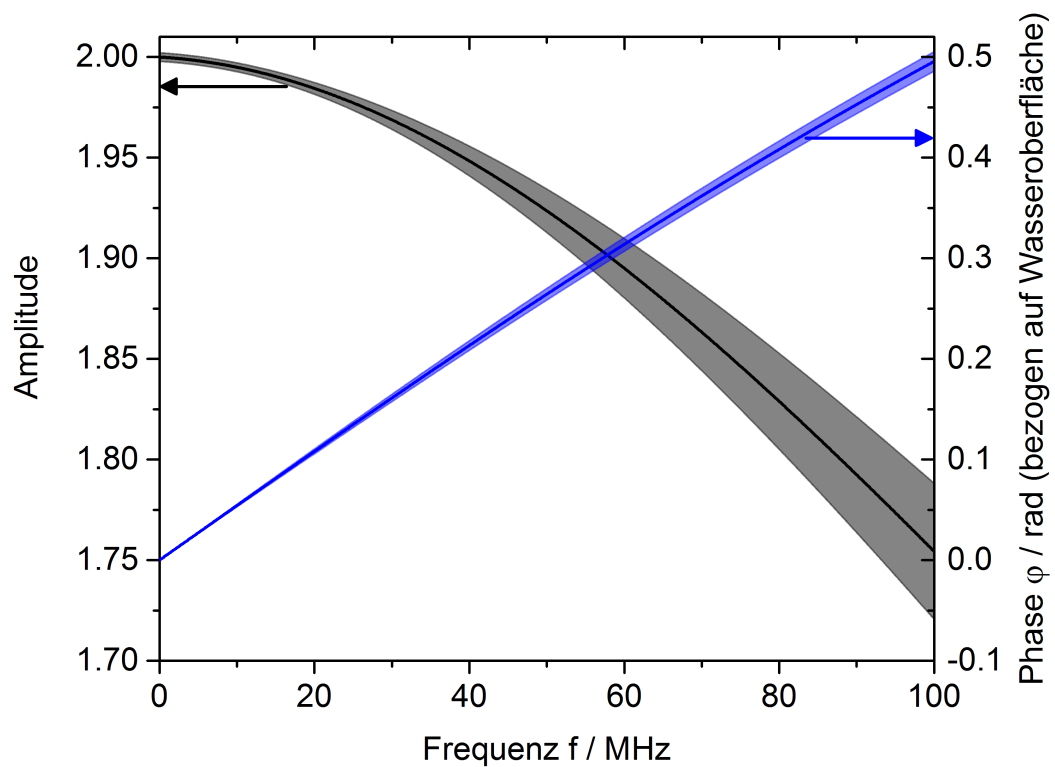


Abbildung 4.5.: Berechnete Folienkorrektur für eine $0,9\,\mu\text{m}$ Folie beschichtet mit 50 nm Aluminium. Der schraffierte Bereich gibt das Unsicherheitsintervall für 68 % ($k = 1$) an.

4.6. Verifizierung der Folienkorrektur

Die hohe Sensitivität des Vibrometers ermöglicht es auch direkt auf der Wasseroberfläche, ohne zusätzliche Folie, die Auslenkung zu messen. Diese Methode wurde bereits in [45] vorgeschlagen, wurde aber bislang aufgrund der geringen Intensität der reflektierten Strahlung nicht für die Hydrophonkalibrierung genutzt. Die hohe Empfindlichkeit des Vibrometers wurde verwendet, um die Übertragungsfunktion der Folie direkt zu verifizieren.

Für die experimentelle Bestimmung wurde zunächst der Ultraschallimpuls unter Verwendung der Folie charakterisiert. Anschließend wurde die Messung ohne Folie wiederholt. Aus den Ergebnissen beider Messungen wurde die Übertragungsfunktion bestimmt, welche in Abbildung 4.6 gezeigt ist. Zum Vergleich ist die berechnete Folienkorrektur dargestellt. Die mittlere Abweichung zwischen der berechneten und der gemessenen Folienkorrektur lag bei 2,1 % [41]. Die geringe Signalstärke des von der Wasseroberfläche reflektierten Laserlichtes erschwert die Messung. Da die Unsicherheit bei der Berechnung einen vergleichbaren Wert hat wie die Abweichung und auch die Messung selbst einen Unsicherheitsbeitrag besitzt, wurde die Messung nur zur Verifikation der Folienkorrektur herangezogen. Der Vorteil bei der Verwendung der Folie ist auch, dass Wellenbewegungen, die infolge von mechanischen Erschütterungen im Tank auftreten, gedämpft werden. Durch die Folie ist damit eine stabilere Messung mit weniger Störungen zu erreichen, weshalb auf die Folie bei der Messung nicht verzichtet wird.

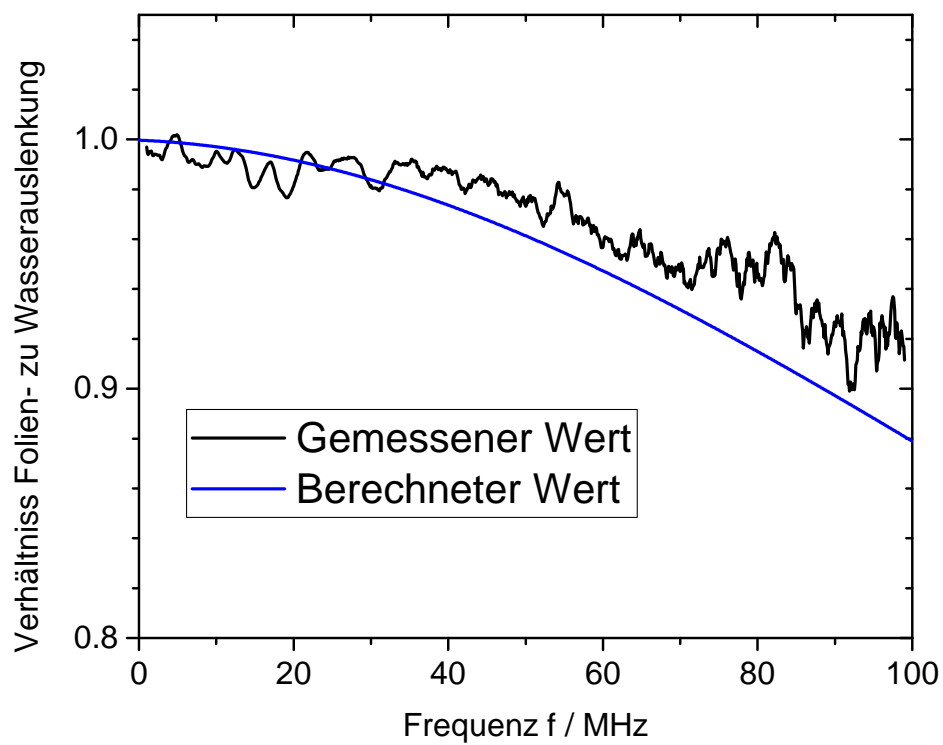


Abbildung 4.6.: Bestimmung der Übertragungsfunktion der Folie durch Messung mit der Folie und mit einer freien Wasseroberfläche und Vergleich mit der berechneten Folienkorrektur.

4.7. Räumliche Mittelung für die Impulsanregung

Das sensitive Element eines Hydrophons besitzt einen typischen Durchmesser zwischen 0,2 mm und 1 mm. Die Hydrophonspannung ist proportional zu dem über die Fläche gemittelten Schalldruck. Bei der Messung mit dem Vibrometer wird der Schalldruck über den Fokusbereich des Laserstrahls gemittelt. Bei dem Objektiv mit einer Vergrößerung von 3,6 sind dies 12 μm . Bei Verwendung eines stärker vergrößernden Objektivs verringert sich der Durchmesser bei der Vibrometermessung weiter.

Für die Erzeugung des Ultraschallfeldes wird ein fokussierender Ultraschallwandler verwendet. Sein Schallfeld besitzt im Messabstand eine charakteristische Schallfeldverteilung. Typischerweise besitzt das Schallfeld ein Maximum des Schalldrucks, von dem ausgehend es in radiale Richtung abfällt. Die Halbwertsbreite des Schallfeldes liegt dabei in derselben Größenordnung wie der Hydrophondurchmesser. Dies hat zur Folge, dass bei der Hydrophonmessung die räumliche Ausdehnung des Schallfeldes einen Einfluss hat und durch die Mittelung über das Schallfeld ein verminderter Schalldruck bestimmt wird. Im Gegensatz dazu kann das Vibrometer als Punktsensor angesehen werden, welches den maximalen Schalldruck erfassen kann.

In der Auswertung wird der Einfluss des Schallfeldprofils korrigiert, weil ansonsten die Hydrophonempfindlichkeit von dem verwendeten Anregungsschallfeld abhängen würde. Hydrophonempfindlichkeiten werden normgerecht in Bezug auf den Einfall ebener Wellen angegeben [38].

Die Bestimmung der räumlichen Mittelung erfolgte anhand gemessener Schallfeldprofile. Diese wurden im Messabstand vom Schallfeldmaximum ausgehend in radialer Richtung bestimmt. Die einzelnen Messungen wurden in den Frequenzbereich transformiert. Anschließend wurde das Schallfeldprofil als Amplitude und Phase gegenüber Frequenz und radialem Abstand aufgetragen, wie dies in Abbildung 4.7 und 4.8 gezeigt ist. Die Phase wurde in die Berechnung der räumlichen Mittelung einbezogen. In Abbildung 4.9 ist die relative Amplitude, bezogen auf dem Wert bei $r = 0$ gezeigt. In dieser Darstellung erkennt man die Frequenzabhängigkeit der Breite des Schallfeldes deutlich. Diese Darstellung wird auch für die folgende Berechnung verwendet.

Die Berechnung der räumlichen Mittelung erfolgt für jede Kombination zwischen Schallfeld und Hydrophon individuell. Dies schließt unterschiedliche Schallfelder aufgrund von geänderten Spektren mit ein. Beispielsweise verändern

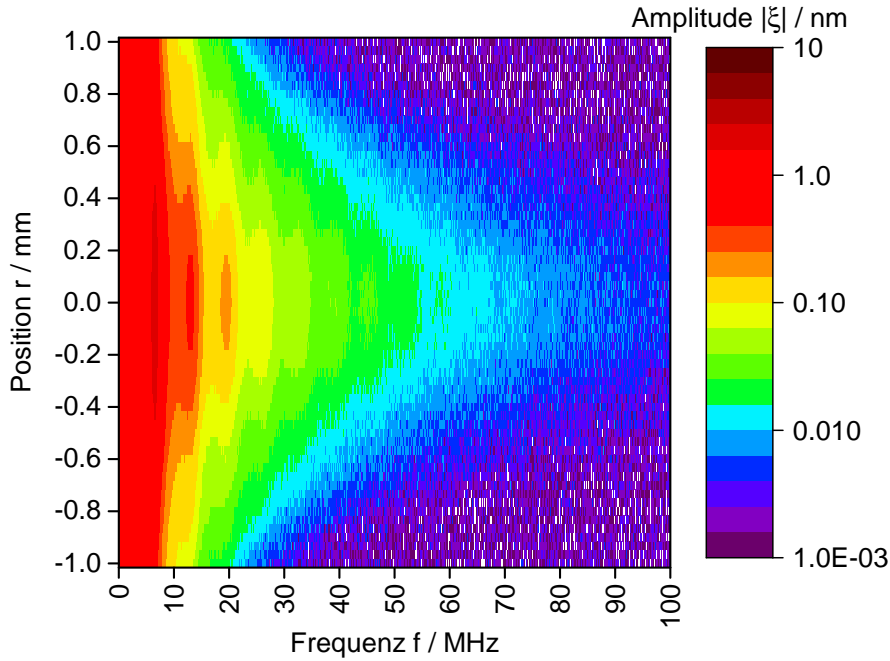


Abbildung 4.7.: Amplitude des Schallfelds in radiale Richtung.

unterschiedliche Kabellängen das Spektrum, wie in der Abbildung 3.5 auf Seite 35 gezeigt, so dass für jede Kabellänge eine individuelle Mittelungskorrektur berechnet wurde. Bei der Berechnung wurde folgendermaßen vorgegangen:

Zunächst wurde vom Maximum ausgehend eine Richtung gewählt und ein radialer (rotationssymmetrischer) Datensatz erzeugt. Das radiale Schallfeldprofil wurde durch ein Polynom 6. Grades in Amplitude und Phase geglättet. Dieses geglättete Schallfeldprofil $S(r)$ wurde anschließend dazu verwendet, um eine numerische Integration über die Hydrophonfläche

$$A_{Hyd} = \pi r_{Hyd}^2 = \int_0^{r_{Hyd}} \int_0^{2\pi} r d\varphi dr \quad (4.4)$$

durchzuführen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Empfindlichkeit des Hydrophons über dem empfindlichen Element gleichmäßig ist, also einem Top-Hat Profil entspricht. Durch Ausnützen der Rotationssymmetrie vereinfachte sich die Berechnung auf eine radiale Integration. Der Korrekturfaktor G_{RM} für die räumliche Mittelung berechnete sich anhand folgender Gleichung:

$$G_{RM} = \frac{A_{Hyd} S(0)}{\int_0^{r_{Hyd}} 2\pi r S(r) dr} \quad (4.5)$$

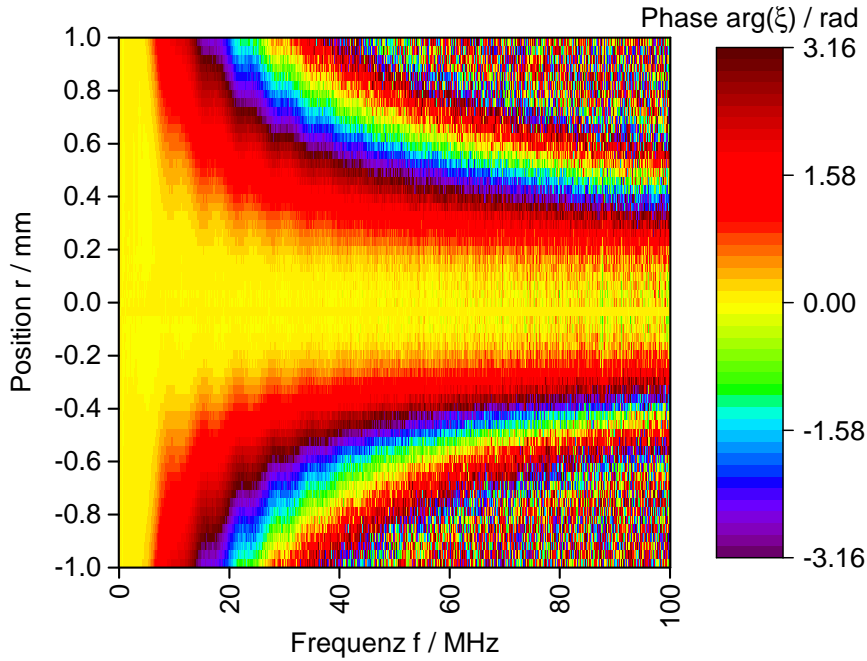


Abbildung 4.8.: Phase des Schallfeldes in Abhängigkeit des radialen Abstandes zu dem Maximum. Die Phase ist dabei auf die Phase bei $r = 0$ mm bezogen.

Die Unsicherheit in der Bestimmung der räumlichen Mittelung wurde durch Variablenvariation bestimmt [46]. Dazu wurde die Berechnung mit dem um seine beigeordnete Unsicherheit vergrößerten Hydrophonradius durchgeführt. Es genügt die Vergrößerung des Hydrophonradius zu betrachten, da dies durch den radialen Abfall des Schallfeldes einen größeren Einfluss auf die Unsicherheit hat, als eine Verkleinerung des Radius. Außerdem wurde die Unsicherheit für die Ermittlung des Maximums mit dem Vibrometer anhand der Wiederholunsicherheit in der Positionierung für das Auffinden des Schallfeldmaximums in die Berechnung einbezogen. Für die Berechnung wurde dazu $S(0)$ durch $S(\pm\delta r)$ ersetzt. Als letzte Unsicherheit wurde die laterale Positionierung des Hydrophons im Schallfeld berücksichtigt. Dazu wurde die räumliche Mittelung für ein relativ zum Schallfeld verschobenes Hydrophon bestimmt. Die Berechnung erfolgt dadurch, dass die verschobene Hydrophonfläche im polaren Koordinatensystem parametrisiert wurde. Details dazu finden sich im Anhang A.

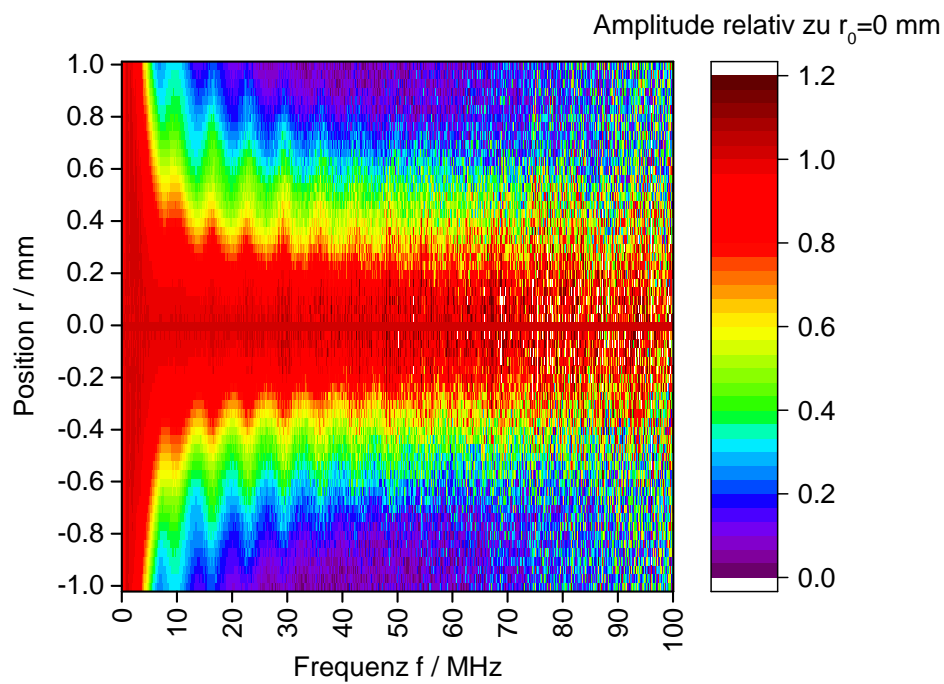


Abbildung 4.9.: Relative Amplitude des Schallfeldes, bezogen auf den Wert bei $r = 0$. Bei der Grundfrequenz 6 MHz, sowie den Harmonischen ist das Schallfeld eingeschnürt. Der Querschnitt des Schallfeldes ist im Bereich von 30 MHz bis mindestens 70 MHz nahezu konstant. Dementsprechend bleibt auch die Mittelungskorrektur konstant.

Die vorhandene geringe Nichtrotationssymmetrie des Schallfeldes wurde dadurch berücksichtigt, dass die Berechnung der räumlichen Mittelung für mehrere Richtungen erfolgte und anschließend die Ergebnisse gemittelt wurden.

Der Einfluss der Phase wird in der veränderten Gleichung

$$G_{RM}^* = \frac{A_{Hyd}|S(0)|}{\int_0^{r_{Hyd}} 2\pi r |S(r)| dr} \quad (4.6)$$

unterdrückt, indem nur der Betrag für die Amplitude des Schallfeldes in die Berechnung eingeht. Der Einfluss der Phase auf die räumliche Mittelung ist in Abbildung 4.10 zu erkennen. Wird der Einfluss der Phase nicht berücksichtigt, so wird in diesem Fall der Korrekturwert der räumlichen Mittelung unterschätzt. Gleichzeitig kann man durch Vergleich zwischen der Rechnung mit und ohne Phase den Frequenzbereich identifizieren, in dem die Phase des Schallfeldes einen Einfluss auf die Korrektur hat.

In der Abbildung ist zusätzlich der typische Korrekturwert für die räumliche Mittelung gezeigt, der bei der Messung bei der Burstanregung mit dem fokussierenden Wandler (vergleiche Abschnitt 3.4.2 auf Seite 33) notwendig ist. Man erkennt, dass der Korrekturwert für die Impulsanregung besonders bei hohen Frequenzen deutlich kleiner ist. Bei der Impulsanregung besitzt das Schallfeld auch bei hohen Frequenzen eine nahezu konstante Ausdehnung (Vergleiche dazu Abbildung 4.9). Dadurch bleibt auch bei hohen Frequenzen der Korrekturwert gering.

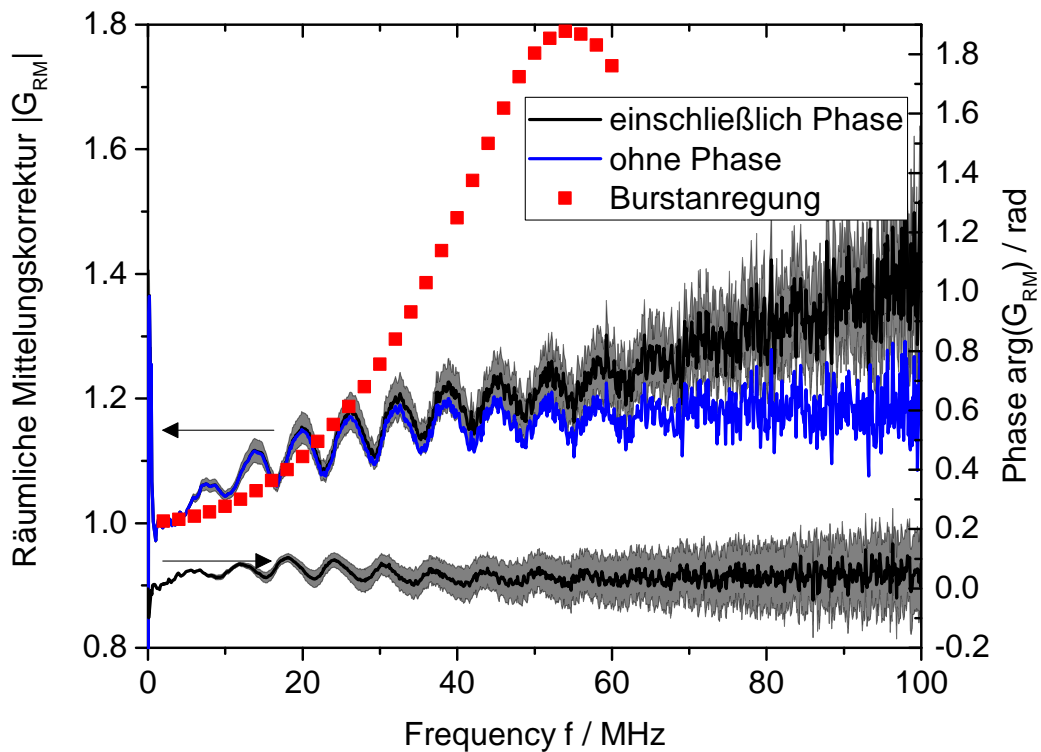


Abbildung 4.10.: Abbildung der berechneten räumlichen Mittelung für ein Hydrophon mit einem effektiven Durchmesser von 0,5 mm. Bei der Berechnung wurde einmal die Phase des räumlichen Schallfeldprofils berücksichtigt und einmal nicht. Bei hohen Frequenzen ist der Unterschied deutlich zu erkennen. Zusätzlich ist auch der Wert der räumlichen Mittelung für die Burstanregung mit einem fokussierenden Wandler gezeigt. Diese ist deutlich größer.

4.8. Bestimmung der räumlichen Mittelung für die Burstanregung

Die räumliche Mittelung bei der Burstanregung wird nach dem Verfahren bestimmt, das bereits an dem homodynem Laserinterferometer eingesetzt wurde [7, 47]. Von dem eingesetzten Ultraschallwandler sind aus früheren Messungen die effektiven Wandlerparameter, diese sind der effektive Wandlerdurchmesser sowie die Brennweite bei fokussierenden Wandlern, bei den einzelnen Frequenzen bekannt. Diese effektiven Wandlerparameter werden verwendet, um in dem z-Abstand das Schallfeld $S(r)$ des Wandlers über das Rayleigh-Integral numerisch zu berechnen. Für einen ebenen Wandler verwendet man dabei die Berechnung nach Schoch [48] und für einen fokussierenden Wandler nach O'Neil [49]. Durch die Integration über den effektive Hydrophonradius r_{Hyd} , wird der räumlich gemittelte Schalldruck für das Hydrophon berechnet. Die Korrektur für die räumliche Mittelung ergibt sich in diesem Fall zu

$$G_{RM} = \frac{\pi r_{Hyd}^2 |S(0)|}{\left| \int_0^{r_{Hyd}} 2\pi r S(r) dr \right|} \quad (4.7)$$

4.9. Abstandsabhängigkeit der Schallfeldwirkung am Messpunkt

Das Schallfeld ändert entlang der Ausbreitungsrichtung sein laterales Profil und seine spektrale Zusammensetzung. Entsprechend wichtig ist es, dass die Messung mit dem Vibrometer und mit dem Hydrophon im gleichen Abstand vom Wandler durchgeführt werden, um das gleiche Schallfeld zu erhalten. Die Abstandseinstellung erfolgt dabei durch Beobachtung der Signallaufzeit zwischen dem elektrischen Anregungsimpuls und dem Eintreffen des Ultraschallsignals an dem Vibrometermesspunkt auf der Folie beziehungsweise Hydrophon. Aus der Laufzeit wird der Abstand berechnet, der für den verwendeten fokussierenden Ultraschallwandler 45 mm beträgt. Der Abstand kann aber nur mit einer gewissen Unsicherheit reproduziert werden. Die typische Unsicherheit in der Abstandseinstellung liegt bei $\pm 25 \mu\text{m}$. Um die Auswirkung der Abstandsänderung auf die Messung zu untersuchen, wurde mit dem Vibrometer der Abstand zwischen Ultraschallwandler und der Folie ausgehend von dem Sollabstand von

45 mm um $\pm 0,1$ mm variiert und der zeitliche Verlauf der Auslenkung der Folie aufgezeichnet. Aus den einzelnen Messergebnissen wurde das Spektrum der Impulse bestimmt und die relativen Änderungen in Abhängigkeit des Abstandes aufgetragen.

In Abbildung 4.11 ist die relative Änderung der Amplitude in Abhängigkeit von Frequenz und Abstandsänderung dargestellt. Aus dieser Darstellung wurde die relative Änderung des Schallfeldes bei Abstandsvariation abgelesen und damit die Unsicherheit abgeschätzt. Bei einer angenommenen Unsicherheit für die Abstandseinstellung von $25\text{ }\mu\text{m}$ ergab sich eine Abweichung der Schallfeldamplitude von $\pm 0,5\%$ im Frequenzbereich von 0 MHz bis 40 MHz. Im Frequenzbereich von 40 MHz bis 100 MHz ist das Signal-Rausch-Verhältnis zu gering, um eine eindeutige Aussage über die Abweichung zu treffen. Da bei der Messung davon auszugehen ist, dass das Signal-Rausch-Verhältnis in diesem Frequenzbereich einen dominanten Beitrag liefert, der bereits in Abschnitt 4.3 (Seite 55) und 4.4 (Seite 58) berücksichtigt wurde, kann der Wert von $\pm 0,5\%$ für den gesamten Messbereich als Unsicherheitsbeitrag angenommen werden.

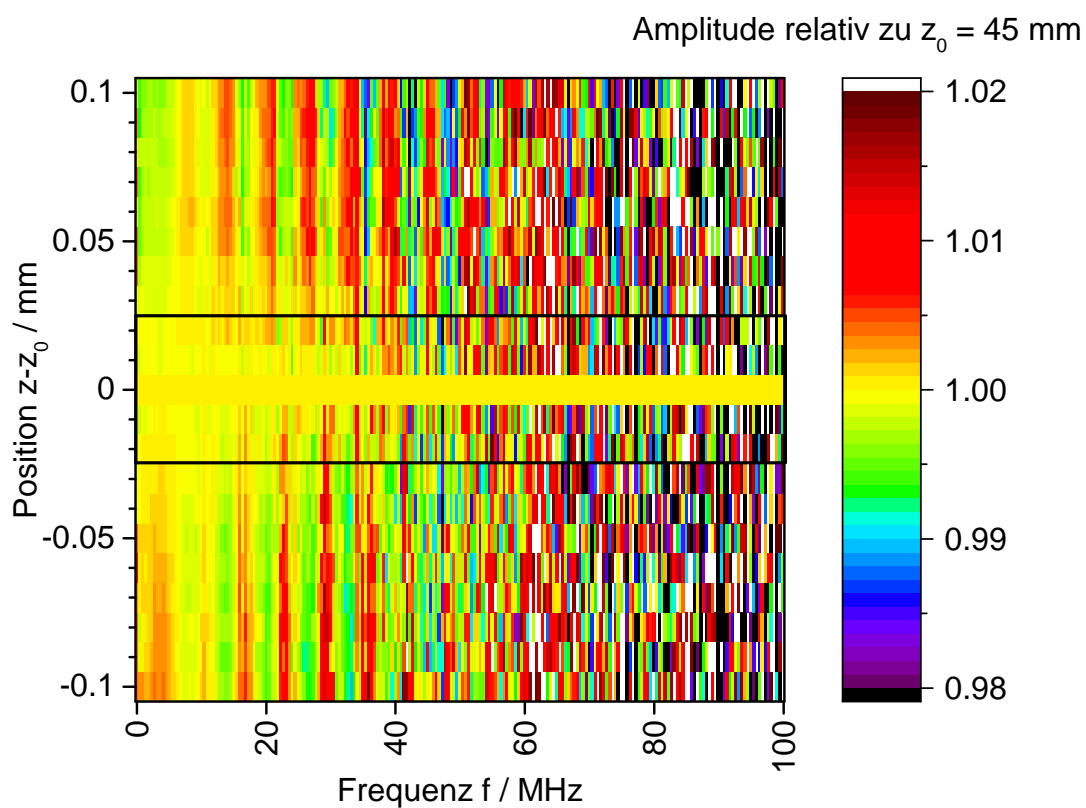


Abbildung 4.11.: Abstandsabhängigkeit des Schallfeldes.

Um die Reproduzierbarkeit der Abstandseinstellung zu verbessern und damit deren Unsicherheit weiter zu reduzieren, wurde ein Programmmodul entwickelt, dass die Kreuzkorrelation zwischen zwei Messreihen berechnet und daraus die zeitliche Verzögerung bestimmt. Die eine Messreihe ist dabei eine abgespeicherte Datei einer Referenzmessung, üblicherweise die Messung mit dem Vibrometer. Bei der Vibrometermessung wurde zuvor der Abstand durch Beobachten des Zeitsignals auf den richtigen Abstand eingestellt. Die Vibrometermessung wurde als feste Referenz gewählt, weil bei dem gewählten Aufbau sich bei der Änderung des Abstandes auch der Wasserspiegel ändert und damit die Folie nicht mehr flach auf dem Wasser aufliegt. Die andere Messreihe ist dabei die laufende Hydrophonmessung, bei der das Hydrophon den gleichen Abstand wie bei der Vibrometermessung einnehmen soll. Jeweils eine Messreihe der Hydrophons wird aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

Aus der zeitlichen Verzögerung wird mittels der Schallgeschwindigkeit im Wasser die Strecke der Verschiebung berechnet. Der Wert wird dazu verwendet, um automatisch über die motorisierten Achsen den Abstand zwischen Sendewandler und Hydrophon anzupassen. Anschließend wird die Hydrophonmessung wiederholt und erneut die Korrelation berechnet, solange bis der optimale Abstand gefunden wurde. Die Auflösung der Verschiebungsbestimmung beträgt, bedingt durch die diskrete Abtastung in Schritten von 2 ns, 3,0 μm . Die Unsicherheit für die Abstandseinstellung beträgt bei diesem Verfahren weniger als $\pm 6,0 \mu\text{m}$. Der Unsicherheitsbeitrag für die Abstandsabhängigkeit des Schallfeldes wurde mit 0,5 % als konservative Schätzung beibehalten.

4.10. Temperaturabhängigkeit und Reproduzierbarkeit des Schallfeldes

Eine Änderung der Wassertemperatur beeinflusst die Dichte, die Schallgeschwindigkeit, die Dämpfung sowie den Nichtlinearitätsparameter [50, 51]. Die Ausbreitung der Ultraschallwellen hängt von diesen Größen ab, weshalb sich das Schallfeld verändert. Da bei der Impulsanregung die nichtlineare Schallausbreitung im Wasser Verwendung findet, wirken sich die Änderungen des Nichtlinearitätsparameters im besonderen Maße auf das Schallfeld aus. Die Veränderung des verwendeten Schallfeldes wurde durch Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Dazu wurde zunächst 18 °C kaltes Wasser in den Tank

gefüllt und die Messung gestartet. Der Abstand zwischen Ultraschallwandler und Vibrometermesspunkt wurde dabei unverändert beibehalten. Die Messung wurde dabei über 21 h während einer Nacht durchgeführt, wobei die Klimatisierung des Raumes abgeschaltet war. Im Verlauf der Messung sorgte die von den Messgeräten erzeugte Abwärme dafür, dass die Raumtemperatur langsam anstieg. Dies führte dazu, dass die Wassertemperatur monoton anstieg. Die Wassertemperatur und der Ultraschallimpuls wurden dabei wiederholt aufgezeichnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.12 gezeigt. In dieser ist die relative Abweichung der Schallfeldamplitude bezogen auf den Wert bei der mittleren Temperatur in Abhängigkeit der Frequenz aufgetragen.

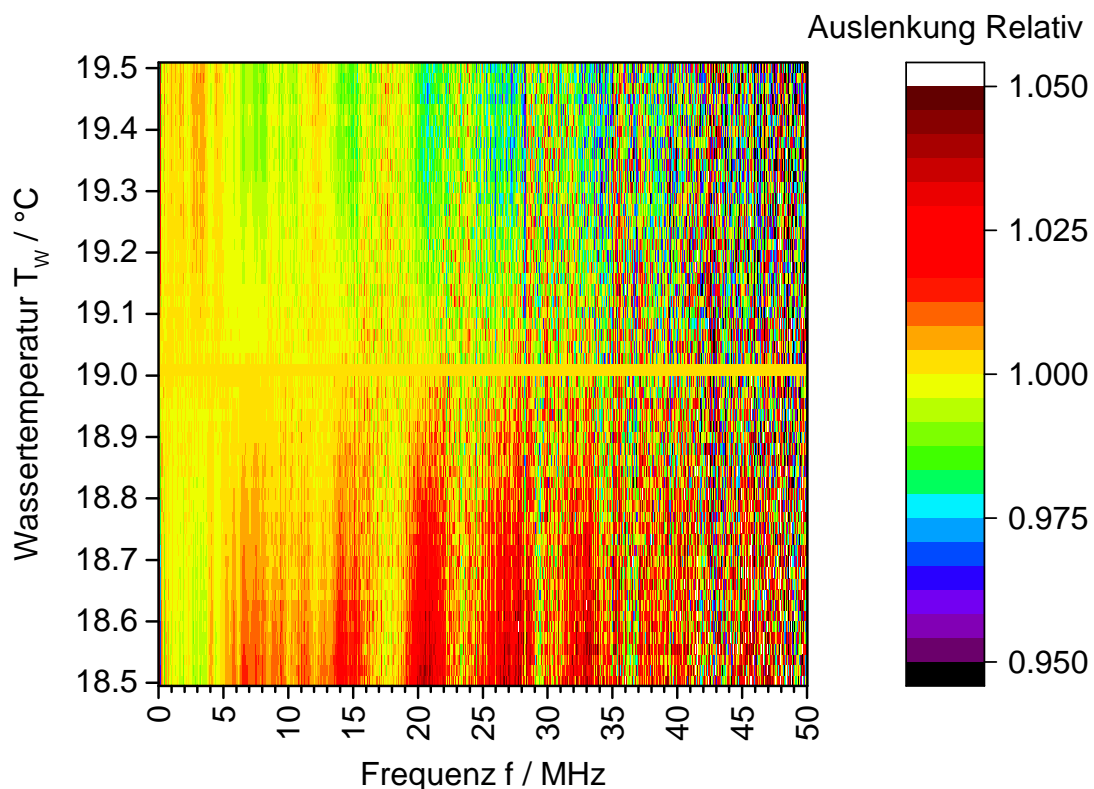


Abbildung 4.12.: Temperaturabhängigkeit der Schallfeldamplitude relativ zu einer Temperatur von 19 °C

Aus dem Messergebnis ergibt sich die Forderung, dass während einer Messung die Wassertemperatur auf $\pm 0,1$ °C konstant gehalten werden muss, damit die Änderung der Schallfeldamplitude bei unter 2 % liegt.

Durch eine weitere Messung über einen Zeitraum von 9 h, während der die Wassertemperatur konstant war, konnte gezeigt werden, dass sich, bedingt durch Änderungen des Wandlers und des Impulsgenerators, das Schallfeld um weniger als 1 % ändert. Der Unsicherheitsbeitrag wird daher mit $\pm 1\%$ als Grenze abgeschätzt.

Diese Forderung nach einer stabilen Wassertemperatur kann mit der Raumklimaanlage nicht zuverlässig erreicht werden. Daher wurde das in Abschnitt 3.9 auf Seite 39 beschriebene System zur Temperierung des Wassers entwickelt. Damit lässt sich auch über längere Zeiträume eine Stabilität der Wassertemperatur auf ± 50 mK erreichen. Außerdem konnte so die Wassertemperatur präzise auf die in der Norm [38] geforderten 20°C geregelt werden.

4.11. Spannungsmessung des Hydrophons mit dem Oszilloskop

Die Hydrophonspannung wird mit dem Oszilloskop *LeCroy WavePro 725Zi-A* gemessen. Zwischen dem Eingang und dem Analog-Digital-Wandler befinden sich innerhalb des Oszilloskops Verstärker und Signalabschwächer. Diese Schaltungselemente besitzen einen Frequenzgang. Um die Spannung absolut messen zu können, wurde dieser Frequenzgang bestimmt und die Korrektur ermittelt. Es wurde nur die Amplitude bestimmt. Der Phasengang wurde als linear angenommen.

Für die Charakterisierung wurden ein rückgeführter Frequenzgenerator, sowie ein rückgeführter Satz an Abschwächern verwendet. Mit dem Frequenzgenerator wurden Sinussignale verschiedener Frequenz erzeugt. Die Messung wurde für die verschiedenen Einstellungen der Vertikalablenkung durchgeführt, die bei der Hydrophonmessung Anwendung finden. Der Oszilloskopeingang war entweder mit einem externen $50\ \Omega$ -Widerstand, um den hochohmigen Eingang zu charakterisieren, oder mit dem internen $50\ \Omega$ -Widerstand abgeschlossen. In Abbildung 4.13 ist der Korrekturfaktor für den Amplitudengang der verschiedenen Vertikalablenkungen und Frequenzen gezeigt.

Der so erhaltene Frequenzgang wurden interpoliert und zur Korrektur der Spannungswerte herangezogen.

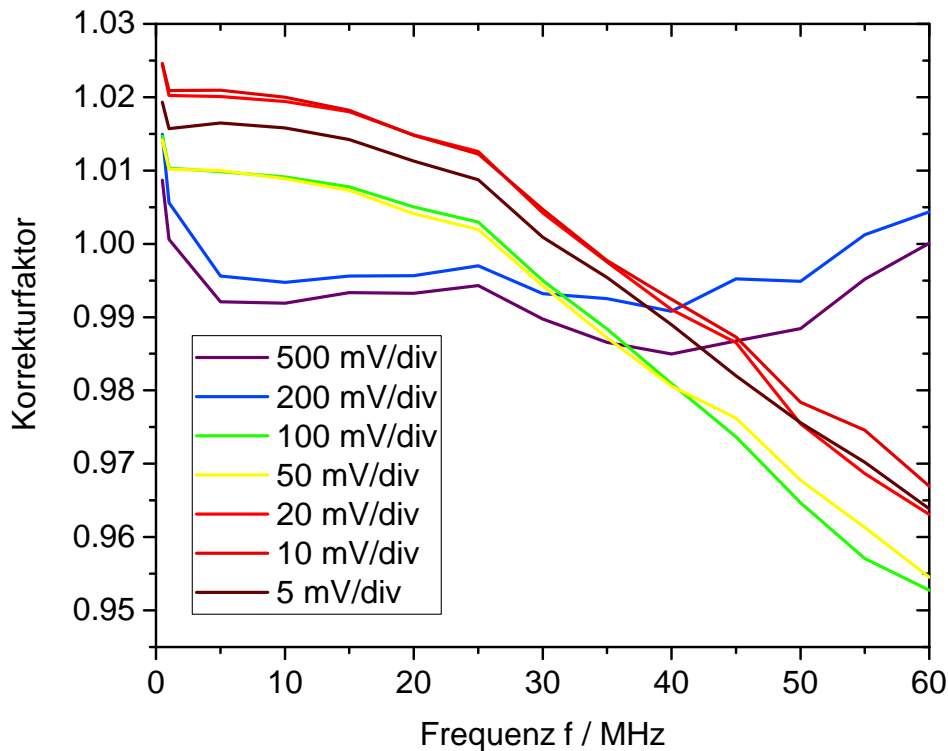


Abbildung 4.13.: Korrekturfaktor des Amplitudengangs des Oszilloskops für verschiedene Vertikalablenkungen bei Verwendung eines externen $50\ \Omega$ -Widerstands.

4.12. Hydrophonvorverstärker und Lastkorrektur

Für Hydrophone mit geringer Empfindlichkeit, das sind im Besonderen Hydrophone mit geringem Durchmesser des sensitiven Elements, wird ein zusätzlicher Signalvorverstärker benötigt. Viele Hydrophone haben bereits einen eingebauten Verstärker, dessen Verstärkungsfaktor in das Kalibrierergebnis eingeht.

Ältere Hydrophone dagegen sind rein passiv aufgebaut. Für diese wird als Kalibrierfaktor die Empfindlichkeit am offenen Kabelende angegeben. Dementsprechend ist die Lastkorrektur zur Berechnung der Empfindlichkeit bei offenen Kabelende zu berücksichtigen. Wird ein zusätzlicher Verstärker verwendet, der nicht mit in die Kalibrierung eingehen soll, ist der Verstärkungsfaktor des eingefügten externen Verstärkers zusätzlich zu berücksichtigen.

4.12.1. Hydrophonsysteme mit eingebautem Verstärker

Hydrophonsysteme mit eingebauten Verstärkern werden als Einheit kalibriert, da der Verstärker untrennbar mit dem Hydrophon verbunden ist. Der Verstärkungsfaktor ist dementsprechend in dem Kalibrierergebnis enthalten. Die eingebauten Verstärker haben typischerweise einen Ausgang, der ein $50\ \Omega$ Kabel treiben kann. Entsprechend wird der hochohmige Oszilloskopeingang mit einem $50\ \Omega$ Durchgangswiderstand abgeschlossen. Wenn von dem Hydrophonhersteller ein $50\ \Omega$ Durchgangswiderstand bereitgestellt wird, wird dieser sowohl bei der Kalibrierung als auch bei dem normalen Messeinsatz des Hydrophons verwendet. Eine Lastkorrektur ist bei Verwendung eines Durchgangswiderstandes nicht notwendig.

4.12.2. Verwendung eines externen Verstärkers

Verfügt das Hydrophon über keinen integrierten Verstärker, dann kommt ein externer Verstärker zum Einsatz, dessen Ausgang an dem mit $50\ \Omega$ abgeschlossenen Oszilloskopeingang angeschlossen wird. Für Hydrophone ohne Verstärker wird die Open-Cable Empfindlichkeit am Kabelende angegeben. Dabei wird der Einfluss der Belastung des Hydrophons durch die Verstärkerimpedanz mit Hilfe der Lastkorrektur (berechnet nach Abschnitt 2.4) korrigiert. Der komplexwertige Verstärkungsfaktor wird benötigt, um die Hydrophonspannung anhand der gemessenen Spannung zu berechnen.

4.12.3. Messung der Hydrophonspannung mit dem Oszilloskop

Bei empfindlichen Hydrophonen und besonders bei Verwendung der Impulsanregung liegt die Hydrophonspannung in einem Bereich, welcher gut mit dem Oszilloskop gemessen werden kann. In diesem Fall wird das Hydrophon direkt mit dem Oszilloskopeingang verbunden. Der Eingang ist dabei hochohmig ($1\ \text{M}\Omega$) um die Belastung des Hydrophons gering zu halten. Für die Lastkorrektur wird die Eingangsimpedanz des Oszilloskops verwendet. Diese wurde mit einem Netzwerkanalysator ermittelt.

Die Messung direkt mit dem Oszilloskop ist besonders dann notwendig, wenn bei der Impulsanregung das Spannungssignal die vorhandenen externen Verstärker übersteuert.

4.13. Modellgleichung und Unsicherheitsbetrachtung

Die Modellgleichung wird im Folgenden unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zusammengefügt. Anhand der Auswertgleichung wird die Hydrophonenempfindlichkeit $M(f)$ bestimmt. Um anschließend die Unsicherheitsbetrachtung formal durchführen zu können, werden auch die einzelnen Unsicherheitsbeiträge als Faktoren in die Gleichung einbezogen. Der Erwartungswert dieser zusätzlichen Faktoren beträgt gegebenenfalls 1. Auf den Erwartungswert des Ergebnisses hat dieser Faktor somit keinen Einfluss. Für alle Faktoren werden die Unsicherheiten als Kovarianzmatrizen angegeben.

Die Größen sind folgende:

- $U(f)$, die Fourier-Transformierte der mit dem Oszilloskop gemessenen Hydrophonspannung. Die dazugehörige Kovarianzmatrix wird anhand der Rauschamplitude abgeschätzt. Siehe dazu Abschnitt 4.4.
- $G_{scope}(f)$, der Faktor zwischen dem angezeigten Spannungswert bei der Messung mit dem Oszilloskop und dem tatsächlichen Spannungswert. Dieser wurde frequenzabhängig unter Verwendung eines rückgeführten Signalgenerators ermittelt. Als Unsicherheitsbeitrag wird die Unsicherheit aus dem Kalibrierschein des Signalgenerators verwendet, siehe dazu auch Abschnitt 4.11.
- $F_{sp}(f)$, die Korrektur der räumlichen Mittelung für das verwendete Hydrophon. Der Wert zusammen mit der Kovarianzmatrix wird anhand des effektiven Hydrophondurchmessers und des experimentell bestimmten Schallfeldes berechnet, siehe dazu auch Abschnitt 4.7. Die Unsicherheiten aus der Justierung von Vibrometer und Hydrophon entlang der x-y-Ebene des Schallfeldes sind hierin eingeschlossen.
- $T(f)$, die Folienkorrektur berechnet anhand der Materialeigenschaften der Folie. Vergleich dazu Abschnitt 4.5.
- $\rho_W c_W$, Dichte und Schallgeschwindigkeit des Wassers. Dieser Faktor vollzieht die Umrechnung von der Partikelgeschwindigkeit zum Schalldruck. Da diese Größen auch in die Berechnung der Folienkorrektur auftreten, wird für die Unsicherheitsberechnung der kombinierte Term $T(f)/(\rho_W c_W)$ betrachtet. Vergleiche dazu auch Abschnitt 4.5.

- $G_{vib}(f)$, die Unsicherheit bei der Vibrometermessung aufgrund des Frequenzgangs der Fotodioden. Der Erwartungswert des Faktors ist 1, siehe dazu auch 4.1.
- $G_{opt}(f)$, der Unsicherheitsbeitrag aufgrund des Beitrags der optischen Gouy-Phase. Der Erwartungswert ist 1. Siehe dazu auch Abschnitt 4.2.
- Der Faktor $2\pi if$, der im Frequenzbereich die zeitliche Differentiation durchführt (Erläuterung dazu siehe bei Gleichung 2.15 auf Seite 16). Die Frequenzskala wird als fehlerfrei angesehen, da die Unsicherheit im ppm Bereich liegt und im Vergleich zu anderen Unsicherheiten vernachlässigt werden kann.
- $\xi(f)$, die Fouriertransformierte der Wegamplitude gemessen mit dem Vibrometer. Die Kovarianzmatrix wird aus der Rauschamplitude der Vibrometermessung abgeschätzt. Vergleich dazu auch 4.3.
- V_{rep} die elektrische Wiederholbarkeit des Impulses zwischen der Vibrometer- und Hydrophonmessung. Der Erwartungswert ist 1. Die Unsicherheit wird anhand der Schwankung des Schalldruckes über den Zeitverlauf abgeschätzt. Siehe dazu 4.10
- V_Z , die Änderung des Schallfeldes in z-Richtung. Da die Messung im gleichen Abstand erfolgt, ist der Erwartungswert 1. Der Abstand kann aber nur mit einer gewissen Unsicherheit eingestellt werden. Die zugehörige Unsicherheit für die Amplitude wird anhand der z-Abhängigkeit des Schalldrucks abgeschätzt, vergleiche dazu Abschnitt 4.9.
- V_{temp} , die Änderung des Schallfeldes aufgrund von Temperaturänderungen des Wassers und den damit einhergehenden Änderungen der akustischen Eigenschaften des Wassers. Der Erwartungswert ist 1. Die Unsicherheit wird aus der relativen Abweichung aufgrund der Temperaturänderung abgeschätzt, siehe dazu auch Abschnitt 4.10. Das Ziel bei der Messung ist es, die Temperaturunterschiede so gering wie möglich zu halten.

Sowie je nach verwendetem Hydrophon gegebenenfalls:

- Die Lastkorrektur unter Verwendung der Impedanz des Hydrophons $Z_H(f)$ sowie der Impedanz des Eingangs $Z_L(f)$ an dem das Hydrophon angeschlossen ist. Die Kovarianzmatrix berechnet sich dabei aus den Unsicherheiten, mit denen die Impedanzen bekannt sind, vergleiche dazu auch Abschnitt 2.4.
- Der komplexwertige frequenzabhängige Verstärkungsfaktor (d. h. Frequenzgang) des Verstärkers, der zwischen Hydrophon und Oszilloskop geschaltet wird. Die Kovarianzmatrix bzw. die Unsicherheit wird bei der Bestimmung des Verstärkungsfaktors ermittelt, siehe dazu Abschnitt 4.12.

Die vollständige Modellgleichung mit allen Unsicherheitsfaktoren lautet nun:

$$M(f) = \underbrace{\frac{U(f)F_{sp}(f)}{G_{scope}(f)}}_{\text{Hydrophon}} \cdot \underbrace{\frac{T(f)G_{vib}G_{opt}}{2\pi i f \xi(f)\rho_W c_W}}_{\text{Vibrometer}} \cdot \underbrace{V_{rep} \cdot V_Z \cdot V_{temp}}_{\text{Wiederholbarkeit}} \cdot \underbrace{\frac{Z_H(f) + Z_L(f)}{Z_L(f)}}_{\text{Lastkorrektur}} \cdot \underbrace{G_{amp}(f)}_{\text{Verstärkung}} \quad (4.8)$$

Zur Berechnung der Gesamtunsicherheit werden zunächst die partiellen Ableitungen bestimmt, ausgewertet und dann in Real- und Imaginärteil nach Gleichung 2.36 (Seite 24) separiert.¹ Die auf diese Weise berechneten Sensitivitätskoeffizienten und die Kovarianzmatrizen werden in die Matrixdarstellung überführt. Durch Matrixmultiplikation wird anschließend die Unsicherheit berechnet. Diese Berechnung wird für jede Frequenz individuell durchgeführt. Für die Grundlagen der Berechnung vergleiche Abschnitt 2.11 auf Seite 23.

¹Da es sich um einen Produktterm mit Potenzen von ± 1 handelt, lässt sich die Berechnung der Ableitungen vereinfachen. Für $A = \frac{B}{C}$ ergibt $\frac{\partial}{\partial B} A = \frac{1}{C} = \frac{A}{B}$ und $\frac{\partial}{\partial C} A = -\frac{B}{C^2} = -\frac{A}{C}$

5. Erweiterung des Interferometers auf Quadraturdetektion

Der erste Interferometermessplatz wurde vor etwa 35 Jahren an der PTB aufgebaut [7, 25]. Er verwendet ein auf den Arbeitspunkt stabilisiertes Homodyn-Interferometer. Bereits damals gab es die Idee, das Interferometer mit Quadraturdetektion zu betreiben [20]. Zur Hydrophonkalibrierung wurde diese Methode aber seit damals nicht weiterverfolgt. Lediglich in einer faseroptischen Variante wurde diese Methode zur Messung von Ultraschallimpulsen und Stoßwellen eingesetzt [52, 53].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Interferometer umgebaut. Es wurde mit neuen Fotodioden versehen, die einen flachen Frequenzgang und eine höhere Grenzfrequenz besitzen. Dabei wurde auch die Quadraturdetektion realisiert. Dadurch ist es möglich, auch Ultraschallimpulse, wie sie bereits beim Vibrometer zum Einsatz kommen, für die Anregung zu verwenden. Die Entwicklung der Software zur Erfassung der Rohdaten mit dem Oszilloskop, der Datenübertragung zu dem Oszilloskop sowie die Auswertung der Daten wurden von Frau Stederer im Rahmen eines Forschungspraktikums durchgeführt [54].

5.1. Aufbau und Funktionsweise

Die Grundidee ist die Messung der Auslenkung der Folie mit einem homodynem Interferometer anstelle des Vibrometers. Daher wird im Folgenden auch nur auf die Besonderheiten des Interferometers und dessen Strahlengang eingegangen, da der übrige Aufbau analog zum Vibrometermessaufbau ist. Der schematische Aufbau des Interferometers ist in Abbildung 5.1 gezeigt. Der Aufbau des Interferometers zur Bestimmung des Ultraschalldruckes ist ebenfalls in [45] beschrieben.

Als Strahlungsquelle wird ein He-Ne-Laser verwendet, der linear polarisiertes Licht mit einer Wellenlänge von 632,816 nm emittiert. Der Laserstrahl wird über

einen polarisierenden Strahlteiler in zwei Strahlen gleicher Intensität geteilt. Dies bedeutet, dass die Polarisationsachse des Laserstrahls in einem Winkel von 45° zur optischen Achse des Strahlteilers steht.

In beiden Armen des Interferometers befindet sich ein $\lambda/4$ -Plättchen. Dieses sorgt dafür, dass zunächst das linear polarisierte Licht in zirkular polarisiertes Licht umgewandelt wird. Nach der Reflexion an dem Spiegel bzw. der Folie und dem anschließend erneuten Durchgang durch das $\lambda/4$ -Plättchen, erhält man wiederum einen polarisierten Laserstrahl. Allerdings ist nun die Polarisationsrichtung um 90° gedreht worden. Am polarisierenden Strahlteiler werden dadurch beide Strahlen so abgelenkt, dass beide aus der verbleibenden freien Facette austreten. Die Polarisation der beiden Strahlen ist orthogonal zueinander. Der Strahl der einen Polarisationsrichtung trägt die Phaseninformation für die Referenzstrecke und der, der anderen, die Phaseninformation der Messstrecke. Ein nicht-polarisierender Strahlteiler teilt beide Strahlen erneut auf. Der eine Strahl wird über einen polarisierenden Strahlteiler auf zwei Fotodioden geleitet, die eine Detektoreinheit für die balancierte Detektion bilden. Der Strahlteiler vor der Fotodiode ist dabei so ausgerichtet, dass seine Polarisationsachse in einem Winkel von 45° zu den Polarisationsrichtungen der Laserstrahlen steht. Dies bewirkt, dass auf den Fotodioden Strahlen aus beiden Armen des Interferometers sich überlagern und interferieren. Gleichzeitig wird so auch eine balancierte Detektion durch zwei balancierte Fotodioden realisiert. Das dabei entstehende Interferenzsignal wird als *I*-Signal bezeichnet.

In den anderen Strahl wird nach dem nicht polarisierenden Strahlteiler ein $\lambda/4$ -Plättchen eingebracht. Dieses wird so ausgerichtet, dass für eine Polarisationsrichtung eine zusätzliche optische Wegdifferenz von $\lambda/4$, im Vergleich zur anderen Polarisationsrichtung, eingebracht wird. Diese Verzögerung entspricht einer Phase von 90° . Anschließend werden, wie bereits bei dem *I*-Signal, beide Polarisationsrichtungen auf einer weiteren Detektoreinheit aus zwei balancierte Fotodioden zur Interferenz gebracht. Das dabei entstehende Signal wird als *Q*-Signal (das *Q* steht für Quadratur) bezeichnet.

Stellt man beide Signale in einem *I*-*Q*-Diagramm dar, so erhält man als Trajektorie einen Kreis. Der Winkel des Ortsvektors bezüglich des Kreismittelpunktes beschreibt dabei die optische Phasendifferenz zwischen den beiden Interferometerarmen. Aus dem Drehsinn des Ortsvektors ergibt sich die Bewegungsrichtung der Folie. Der Frequenzgang der Fotodioden kann dazu führen, dass sich der Durchmesser der Kreisbahn, abhängig von der Frequenz, ändert.

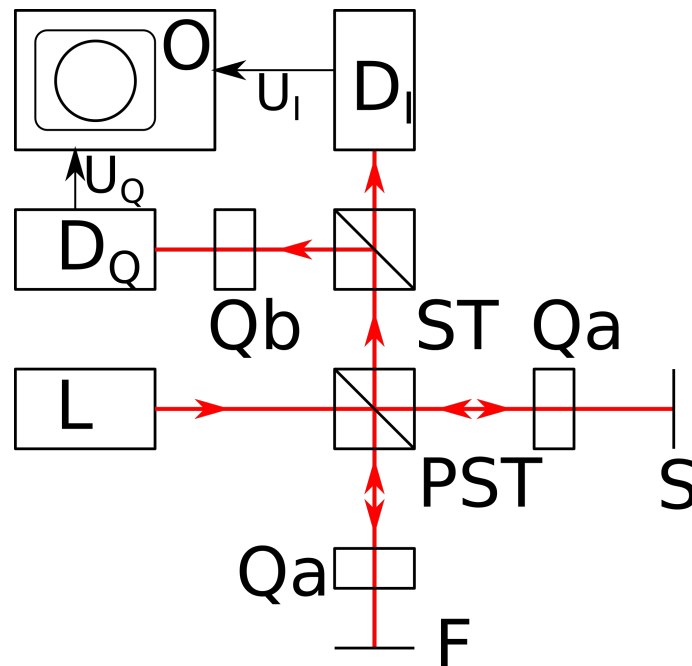


Abbildung 5.1.: Schematischer Aufbau und Strahlengang des Quadraturinterferometers. Der Laser (L) sendet seinen Strahl auf einen polarisierenden Strahlteiler (PST). Dieser teilt den Strahl in zwei Strahlen auf. Diese werden von dem Spiegel (S) und der Folie (F) reflektiert. Die beiden $\lambda/4$ -Plättchen (Qa) sorgen für eine Drehung der Polarisationssebene um 90° nach zweimaligem Durchgang. Die reflektierten Strahlen können dadurch den PST in vertikaler Richtung verlassen. Der nachfolgende Strahlteiler (ST) teilt die Strahlung in zwei Richtungen auf. Der Fotodetektor D_1 erfasst das Interferenzsignal. Der Fotodetektor besteht dabei aus einem polarisierenden Strahlteiler und zwei Fotodioden für die balancierte Detektion. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde dies nicht dargestellt. Der andere Teil des Strahls durchläuft ein weiteres $\lambda/4$ -Plättchen (Qb), welches den optischen Weg einer Polarisationsrichtung gegenüber der anderen verlängert. Anschließend interferiert das Signal und erzeugt das Quadratursignal auf dem Fotodetektor D_Q . Die beiden Spannungssignale U_1 und U_Q werden mit dem Oszilloskop (O) erfasst.

5.2. Auswertung der Quadratursignale

Eine Herausforderung bei der Auswertung der Quadratursignale ist es, dass die verwendeten balancierten Fotodioden (*New Focus Models 1607-AC*) [55] zwei getrennte Ausgänge besitzen. Der erste Ausgang liefert ein gleichspannungsgekoppeltes Signal, begrenzt von einem Tiefpass bei 15 kHz. Der zweite Ausgang liefert nur ein Wechsellspannungssignal, das durch einen Hochpass bei 40 kHz begrenzt ist. Beide Ausgänge besitzen jeweils einen eigenen Verstärker, wodurch sich die Verstärkungsfaktoren unterscheiden.

Das Ultraschallsignal ist daher nur in dem Wechsellspannungsausgang vorhanden. Da bei diesem Ausgang der Gleichspannungsanteil fehlt, der die Ausgangsphase und die Signalstärke beschreibt, startet das Signal immer am Nullpunkt. Dies ist in Abbildung 5.2a) zu sehen. Der weitere Signalverlauf ist dann von der Differenz der optischen Wege abhängig. Die Trajektorie ist damit ein verschobener Kreisbogen. Während der Auswertung muss diese Verschiebung rechnerisch korrigiert werden.

Als erster Schritt wird die Startphase rekonstruiert, um die Lage des Startpunktes zu bestimmen. Dazu werden zunächst mehrere niederfrequente Signale erfasst. Da die Messzeit gegenüber der Grenzfrequenz des Tiefpassfilters kurz ist, ändert sich die Signalspannung nicht wesentlich und es kann der Mittelwert bestimmt werden. Dieser wird für die weitere Berechnung verwendet. Mit allen diesen Mittelwerten wird die Korrektur der Kreisform mit dem von Heydemann vorgeschlagenem Verfahren [56] durchgeführt. Mit dem so bestimmten Parametersatz kann die Startphase für alle Signale ermittelt werden. Dadurch ist für alle Signale die Richtung bekannt, in die das Signal gegenüber dem Kreismittelpunkt verschoben wurde. Der Radius der Verschiebung wird ermittelt, indem durch einen Fit der Radius des Kreises ermittelt wird, für den die gemessenen Signale die geringste Abweichung von der Kreisform ergeben. Aus den vorhergehenden Schritten ergibt sich ein Parametersatz für die Heydemannkorrektur des niederfrequenten Signals zur Bestimmung der Startphase und für den Radius des hochfrequenten Signals. Mit diesem ist es dann möglich, alle Signale zu korrigieren, was in 5.2b) gezeigt ist. Aus dem Phasenwinkel des korrigierten hochfrequenten Signals wird die Auslenkung der Folie bestimmt.

$$\zeta(t) = \lambda \cdot \frac{\varphi(t)}{4\pi} \quad (5.1)$$

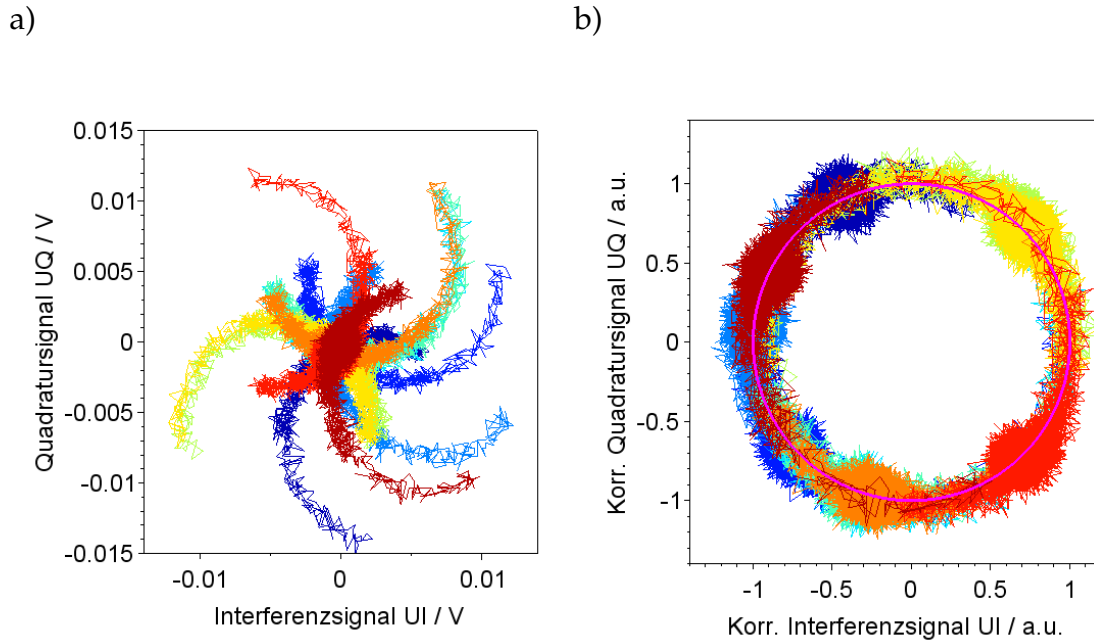


Abbildung 5.2.: In a) ist das Spannungssignal der Fotodioden bei der Messung eines Ultraschallimpulses dargestellt. Da die Fotodioden wechsellspannungsgekoppelt sind, befindet sich der Startpunkt immer am Ursprung des Koordinatensystems. Die Richtung des Bogens ist von der optischen Phase abhängig. In b) wurde das Signal korrigiert, damit es auf dem Einheitskreis liegt. Der magentafarbene Kreis visualisiert dabei den Einheitskreis.

In Abbildung 5.3 ist ein mit dem Vibrometer gemessenes Ultraschallsignal zu sehen und zum Vergleich das gleiche Signal mit der gleichen Mittelungszahl gemessen mit dem Interferometer. In der Abbildung erkennt man auch das stärkere Rauschen bei der Messung mit dem Interferometer im Vergleich zu dem Vibrometer. In Abbildung 5.4 ist das Verhältnis der Messungen von Interferometer zu dem Vibrometer im Spektrum dargestellt. Auch hier erkennt man die Auswirkung des Rauschens auf die Messung.

Die übrigen Schritte zur Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit sind dann analog zur Auswertung bei einer Messung mit dem Vibrometer.

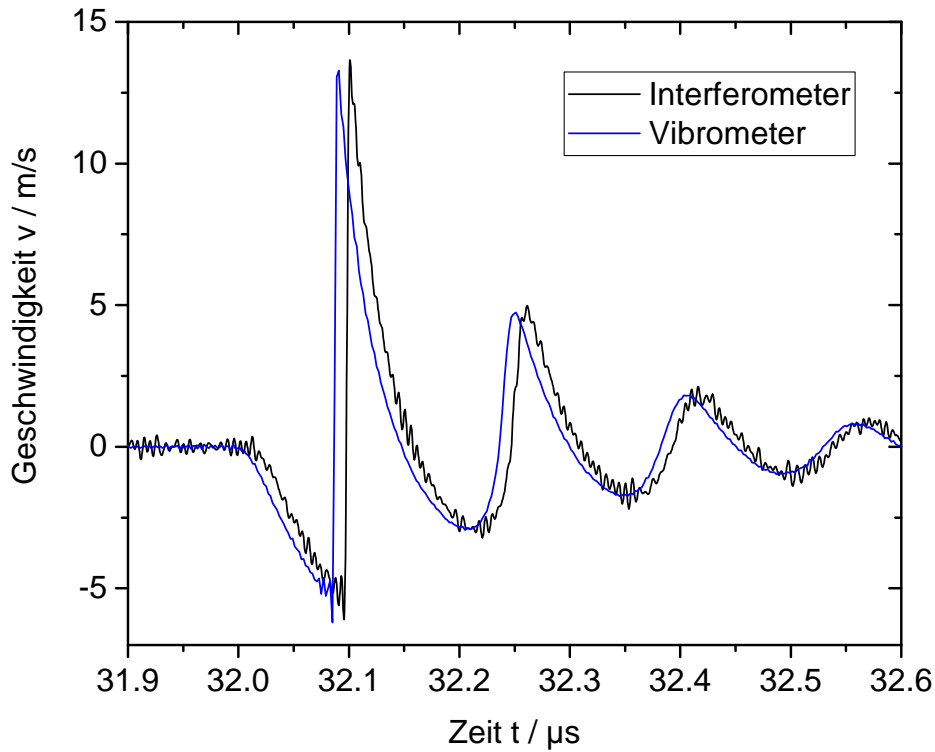


Abbildung 5.3.: Vergleich zwischen Interferometer und Vibrometermessung im Zeitbereich.

5.3. Unsicherheitsbetrachtung

5.3.1. Modellgleichung

Die Unsicherheit wurde mittels Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt. Dazu wurde zunächst der Messprozess modelliert. Die zu messende zeitabhängige Auslenkung der Folie ist $\xi(t)$. Das Signal der Fotodiode im I-Zweig ist

$$U_I(t) = U_{I,0} \cos \left(2\pi \frac{\xi(t)}{\lambda} + \varphi_0 \right) \quad (5.2)$$

und für den Q-Zweig

$$U_Q(t) = U_{Q,0} \cos \left(2\pi \frac{\xi(t)}{\lambda} + \varphi_0 + \varphi_{opt} \right) \quad (5.3)$$

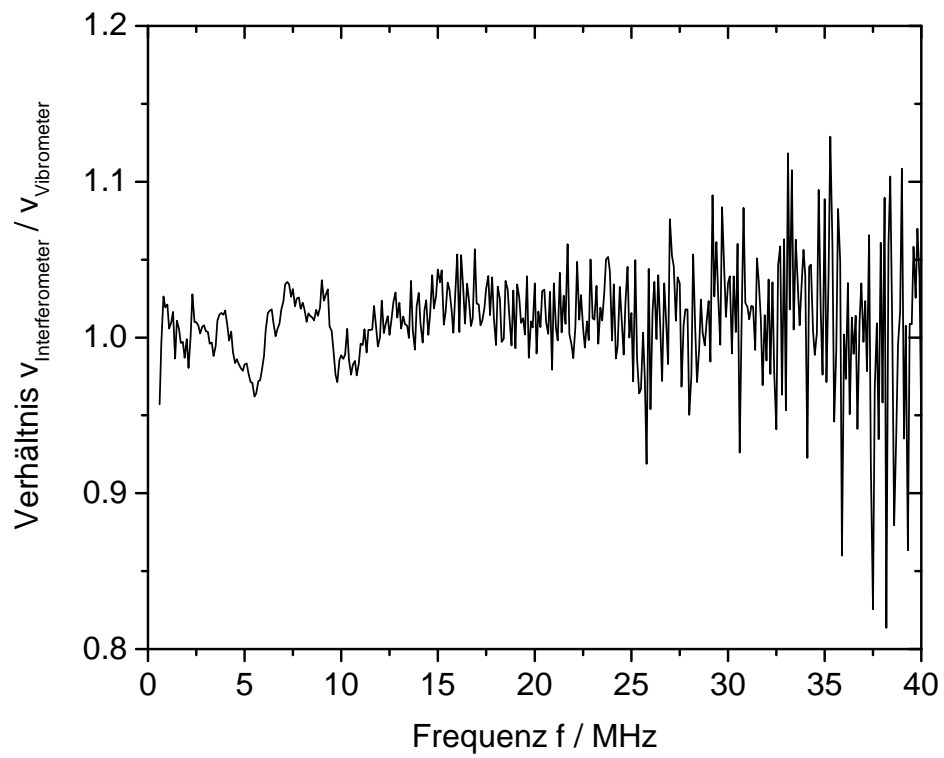


Abbildung 5.4.: Verhältnis zwischen der gemessenen Geschwindigkeit mit dem Vibrometer und dem Interferometer.

$U_{I,0}$ und $U_{Q,0}$ sind die Spannungsamplituden an den Fotodioden für das Interferenzsignal. φ_0 ist die Startphase, die sich aus dem momentanen Weglängenunterschied in den Interferometerarmen ergibt. φ_{opt} ist die optische Phasenverschiebung für das Quadratursignal. Diese wird durch das Viertelwellenlängen-Plättchen realisiert und idealerweise 90° betragen.

Das Fotodiodensignal wird durch einen Hochpass gefiltert.

$$U_{I,HP}(t) = U_I(t) - U_{I,0} \cos(\varphi_0) \quad (5.4)$$

$$U_{Q,HP}(t) = U_Q(t) - U_{Q,0} \cos(\varphi_0 + \varphi_{opt}) \quad (5.5)$$

Der elektrische Ausgang der Fotodiode besitzt eine Offsetspannung, die in der Unsicherheitsbetrachtung berücksichtigt werden muss. Dies wird in der Simulation durch die Terme δU_I und δU_Q berücksichtigt.

Die Startphase φ_0^* wird aus dem Gleichspannungssignal, das an dem tiefpassgefiltertem Ausgang der Fotodiode anliegt, rekonstruiert. Die Spannungsamplitude ($U_{I,0}^*$ und $U_{Q,0}^*$) für das Interferenzsignal wird durch eine Least-Square-Anpassung der Daten ermittelt.

$$U_{I,R}(t) = U_{I,HP}(t) + U_{I,0}^* \cos(\varphi_0^*) + \delta U_I \quad (5.6)$$

$$U_{Q,R}(t) = U_{Q,HP}(t) + U_{Q,0}^* \cos(\varphi_0^* + \varphi_{opt}) + \delta U_Q \quad (5.7)$$

Das Signal der Auslenkung wird rekonstruiert als

$$\xi^*(t) = \tan^{-1} \left(\frac{-U_{Q,R}(t)}{U_{I,R}(t)} \frac{U_{I,0}^*}{U_{Q,0}^*} \right). \quad (5.8)$$

Dabei berücksichtigt der Arkustangens auch die Fallunterscheidung der vier Quadranten. Anschließend werden eventuell auftretenden Sprünge von 2π behoben.

Die Unsicherheit ergibt sich dann aus der Differenz zwischen $\xi(t)$ und $\xi^*(t)$. Die Unsicherheit wird auch spektral betrachtet, wozu das Verhältnis der Amplituden sowie der Phasen berechnet wird.

5.3.2. Berechnung

Die Werte und Unsicherheiten wurden anhand wiederholter Messung und Auswertung abgeschätzt. Für die Spannungsamplitude wurde $U_{I,0} = U_{I,0}^* = 6,93 \text{ mV}$ und $U_{Q,0} = U_{Q,0}^* = 7,38 \text{ mV}$ bestimmt. Die Standardabweichung für $U_{I,0}^*$ und $U_{Q,0}^*$ betrug $86,6 \text{ } \mu\text{V}$.

Die Unsicherheit für die Bestimmung der Offsetspannung betrug $77 \text{ } \mu\text{V}$. Da die Offsetspannung korrigiert wurde, kann der Erwartungswert mit 0 angenommen werden.

Die Startphase φ_0 wurde zufällig im Intervall $[0, 2\pi[$ gewählt. Die Größe φ_0^* hat den selben Wert, wie φ_0 , allerdings ist sie mit einer Unsicherheit behaftet, die sich aufgrund der Bestimmung der Phase auf dem niederfrequenten Signal ergibt. Die Standardabweichung wurde dabei mit $0,01 \text{ rad}$ abgeschätzt.

Die Wellenlänge λ ist für einen He-Ne-Laser stabil und hinreichend genau bekannt, so dass sie für diese Unsicherheitsbetrachtung als fehlerfrei angesehen werden kann. Die optische Phase beträgt $\pi/2$. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Varianz, mit der die optische Phase auf $\varphi_{opt} = \pi/2$ eingestellt werden kann. Die Standardabweichung wurde mit $0,02 \text{ rad}$ abgeschätzt.

Für die Simulation wurde ein mit dem Vibrometer gemessenes Ultraschallsignal (Vergleiche dazu Abbildung 2.3) verwendet. Die Abweichungen zwischen dem rekonstruierten Signal relativ zu dem eingesetzten Signal, wurden spektral ausgewertet. Das Ergebnis für die berechneten Unsicherheiten ist in Abbildung 5.5 gezeigt.

Die Unsicherheit für die Amplitude bei der Messung mit dem Interferometer liegt zwischen $1,2 \%$ und $5,0 \%$ und ist damit deutlich größer als die Unsicherheit bei der Messung mit dem Vibrometer, welche bei unter 1% liegt.

Hinzu kommt noch die Unsicherheit aufgrund des Signal-Rausch-Verhältnisses, die bestimmt wird, indem eine Messung ohne Ultraschallsignal durchgeführt wird. Für das Interferometer ist dieser Beitrag ebenfalls größer als bei der Verwendung des Vibrometers.

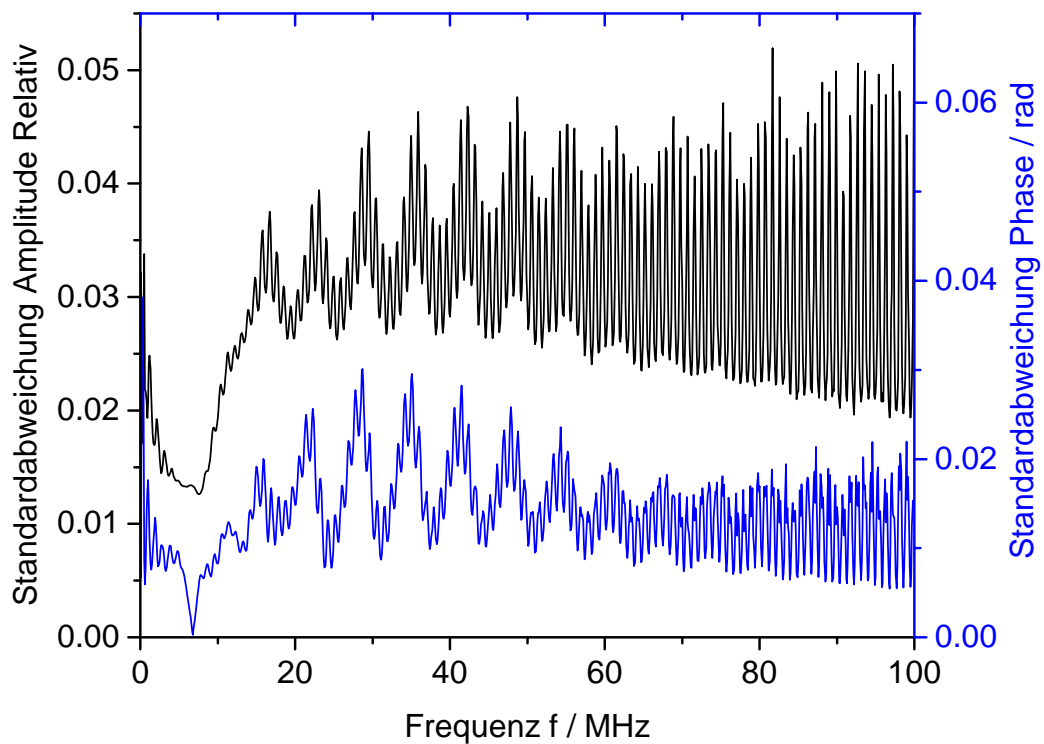


Abbildung 5.5.: Ergebnis der Montecarlosimulation zur Bestimmung der Unsicherheit resultierend aus der Auswertung des Interferometers. Es ist die Standardabweichung für die Amplitude relativ und die Standardabweichung für die Phase im Bogenmaß dargestellt.

6. Bestimmung der Hydrophonempfindlichkeit von Membranhydrophonen

Die zuvor beschriebenen Messstände werden für die Kalibrierung von Hydrophonen genutzt. Die zu kalibrierenden Hydrophone sind überwiegend Membranhydrophone. Diese eignen sich in besonderem Maße für die Weitergabe der Einheit Ultraschallwechseldruck, da sie eine ausgezeichnete Langzeitstabilität aufweisen und einen glatten Frequenzgang besitzen. Es können aber prinzipiell auch andere Hydrophontypen kalibriert werden, beispielsweise die ebenfalls häufig verwendeten Kapselhydrophone.

Die folgenden Ergebnisse beschränken sich auf das Kalibrieren von Membranhydrophonen. Einige der Hydrophone dienen bereits seit mehreren Jahrzehnten als Referenzhydrophone in der PTB. Aus diesem Grund ist ihr Langzeitverhalten gut bekannt, so dass der Vergleich des neuen Messstands mit historischen Daten möglich ist.

6.1. Hydrophon IP037

Das Hydrophon mit der Bezeichnung IP037 stammt vom Hersteller *General Electric Company (Marconi Research Center), England*. Es handelt sich um ein koplanares Membranhydrophon mit einer 25 µm dicken PVDF Membran. Der nominelle geometrische Durchmesser des sensitiven Elements ergibt sich aus der Größe der Elektroden und beträgt 0,5 mm. Der effektive Durchmesser wurde anhand von Messungen der Richtcharakteristik bestimmt. Bei 15 MHz beträgt der Durchmesser effektive 0,51 mm. Der effektive Durchmesser ist geringfügig größer als

der nominelle Durchmesser, da bei der Polarisierung der piezoelektrischen Folie während des Fertigungsprozesses auch der Randbereich mitpolarisiert wird. In Abbildung 6.1 ist eine Fotografie des Hydrophons gezeigt.

Das Hydrophon dient als Referenzhydrophon für das TDS Messverfahren [57]. Bei dem TDS Verfahren werden zwei Hydrophone miteinander verglichen, wobei von einem, dem Referenzhydrophon, das Übertragungsmaß bekannt ist. Die Primärkalibrierung des Referenzhydrophons erfolgte bislang mit dem Interferometer und dadurch ist auch bekannt, dass das Hydrophon über viele Jahre seine Empfindlichkeit nicht verändert hat. Daher ist es prädestiniert für den Vergleich zwischen den verschiedenen Messverfahren.

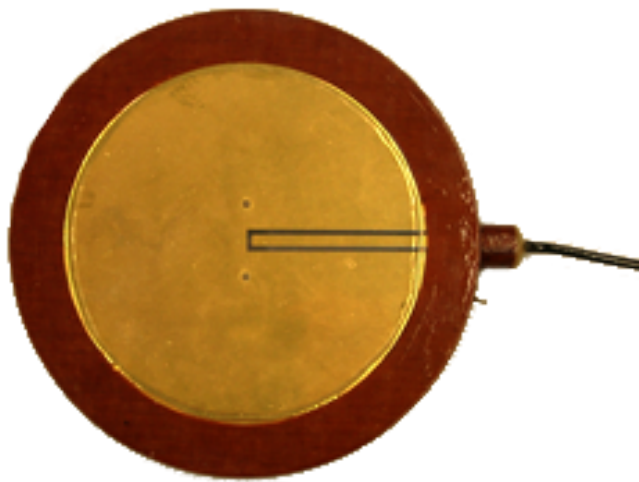


Abbildung 6.1.: Fotografie des Hydrophons IP037.

6.1.1. Impulsanregung und Messung mit dem Vibrometer

Für die Ermittlung der Hydrophonempfindlichkeit wurden die Impulsanregung und das Vibrometer verwendet. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 6.2 gezeigt. Die erweiterte Messunsicherheit (für $k = 2$) ist ebenfalls in diesem Graphen dargestellt. In Abbildung 6.3 ist der zugehörige Phasengang dargestellt. Der Phasengang ist dabei bis auf eine Ursprungsgerade bestimmt, die die Gruppenlaufzeitdifferenz beschreibt. Die Unbestimmtheit ist auf die zeitliche Verzögerung der Impulsflanken zwischen der Messung mit dem Vibrometer und dem Hydrophon zurückzuführen. Für die Impulsentfaltung sei angemerkt, dass

der lineare Beitrag des Phasengangs zu einer zeitlichen Verschiebung des Signals führen kann. Auf die Signalform im Zeitbereich nach der Entfaltung hat dies, abgesehen von der zeitlichen Verzögerung des gesamten Signals, keinen Einfluss, das heißt typische Ultraschallfeldkenngrößen wie maximaler und minimaler Schalldruck und abgeleitete Intensität bleiben davon unbeeinflusst.

In den Diagrammen sind die Werte für Amplitude und Phase dargestellt. Die zugrundeliegenden Werte wurden als komplexe Zahlen bestimmt. Entsprechend dem GUM [34] wird der Real- und Imaginärteil als Ergebnis der Kalibrierung weitergegeben. Die Darstellung als Amplitude und Phase in den Diagrammen dient lediglich der besseren Visualisierung. Bei der Berechnung der Unsicherheiten wurde auch die Korrelation zwischen Real- und Imaginärteil ermittelt. Dieser ist Bestandteil der Kalibrierdaten und wird für spätere Berechnungen weitergegeben.

Für ausgewählte Frequenzen sind die Werte und zugehörigen Unsicherheitsbeiträge in Tabelle 6.1 wiedergegeben.

Die Charakterisierung mittels Impulsanregung erfolgte einmal im April 2016 und wurde im Februar 2018 noch einmal wiederholt. Die dabei erzielten Resultate stimmten gut überein. Die Unsicherheiten konnten bei der Wiederholmessung reduziert werden, da im Verlauf dieser Arbeit die Unsicherheitsbeiträge genauer abgeschätzt werden konnten.

Der durch die Messung mit dem Vibrometer bestimmte Phasengang stimmt gut mit dem Resultat der TDS Messung überein. Für die TDS Messung wurde als Referenz für den Phasengang ein breitbandiges Hydrophon mit einem flachen Phasengang eingesetzt. Lediglich bei niedrigen Frequenzen unter 2 MHz und bei Frequenzen oberhalb von 50 MHz treten Abweichungen auf. Die Abweichungen bei niedrigen und hohen Frequenzen sind darauf zurückzuführen, dass das TDS Verfahren dort an seine Grenzen stößt und dort der Einfluss des Rauschens zunimmt.

6.1.2. Burstanregung und Messung mit dem Vibrometer

Das Vibrometer wurde ebenfalls zusammen mit der Burstanregung eingesetzt. Dazu wurden die Geräte und Verfahren verwendet, wie sie auch an dem Interferometer zum Einsatz kommen. Lediglich die Messung der Folienauslenkung geschieht durch das Vibrometer anstelle des Interferometers und die Erfassung

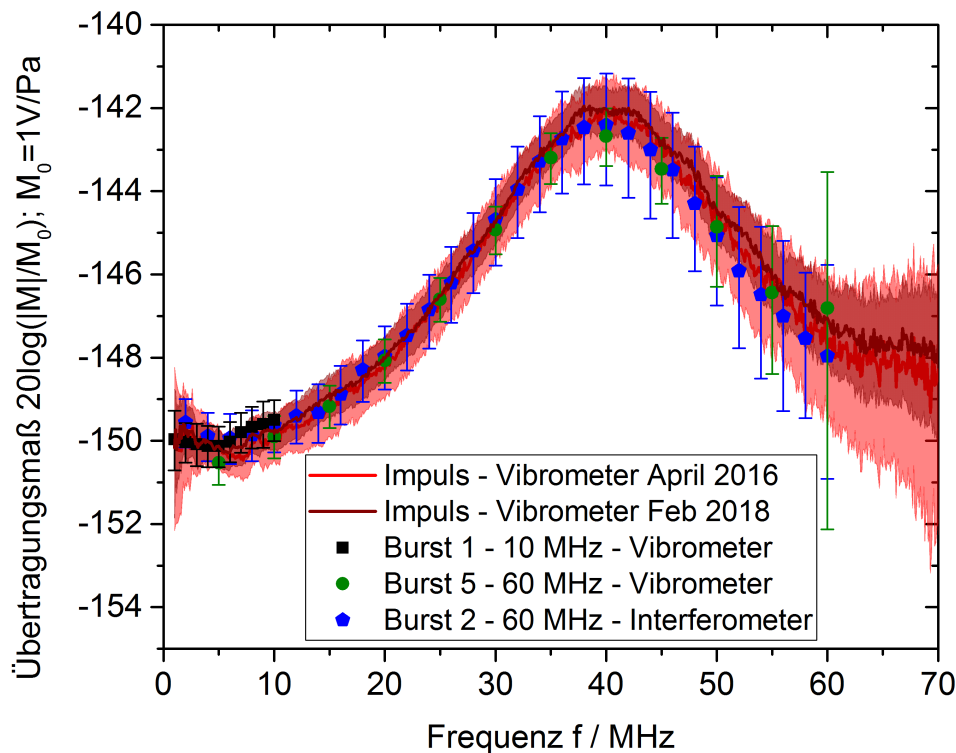


Abbildung 6.2.: Amplitudengang des Hydrophon IP037. Es sind die Ergebnisse der Impulsanregung gezeigt. Zum Vergleich sind auch die Resultate von Burstmessungen (vergleiche Abschnitt 6.1.2) abgebildet, die sowohl mittels Vibrometer als auch an dem Interferometer durchgeführt wurden.

der Spannung mit dem Oszilloskop *LeCroy WavePro 725Zi-A*. Aus dieser Messung ist ein direkter Vergleich zwischen dem Vibrometer und dem Interferometer möglich. Zum Vergleich ist das Ergebnis einer Kalibrierung mit dem Interferometer ebenfalls in der Abbildung 6.2 dargestellt.

Es wurden zwei Messreihen, einmal von 1 MHz bis 10 MHz und das andere Mal von 5 MHz bis 60 MHz durchgeführt. Diese wurden mit unterschiedlichen Ultraschallwandlern durchgeführt, da ein Ultraschallwandler nicht den gesamten Frequenzbereich abdecken kann.

Aus den Ergebnissen zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Resultaten der Impulsanregung und der Burstanregung. Bei den Ergebnissen der Burstanregung fällt ein Anstieg der Unsicherheit bei hohen Frequenzen auf.

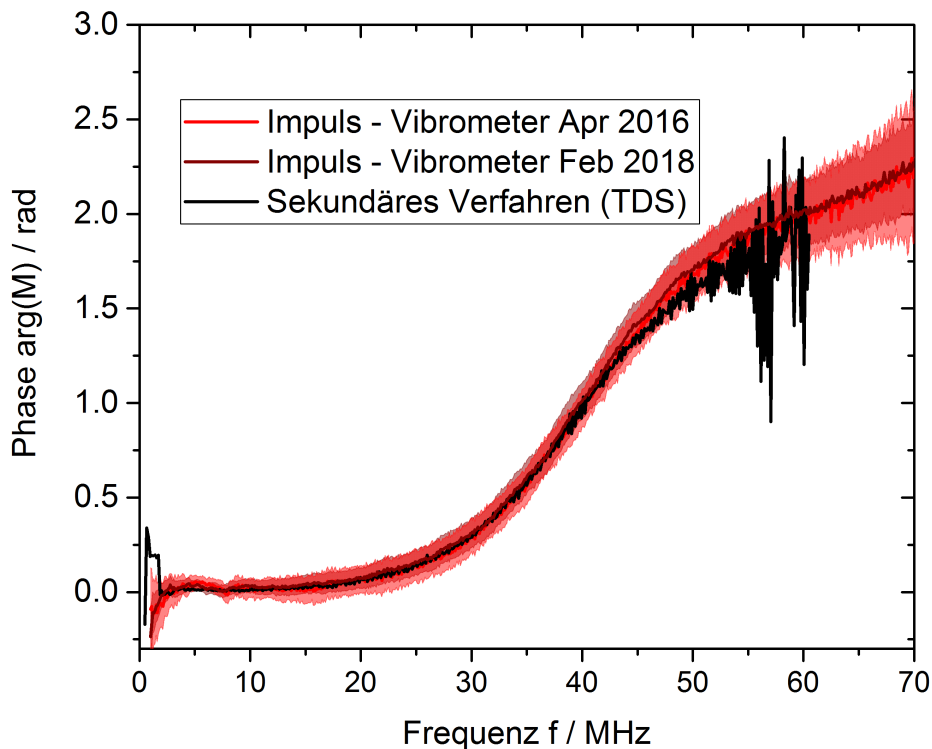


Abbildung 6.3.: Phasengang des Hydrophons IP037. Der Phasengang wurde durch die Impulskalibrierung mit dem Vibrometer ermittelt. Zum Vergleich ist der Phasengang gezeigt, der über das sekundäre TDS Verfahren [57] bestimmt wurde, in dem das Hydrophon IP037 mit einem Hydrophon, für das ein flacher Frequenzgang zu erwarten war, verglichen wurde.

Diese ist einmal durch die geringe Signalamplitude des Ultraschallfeldes und dem damit einhergehenden geringen Signal-Rausch-Verhältnis begründet. Gleichzeitig ist aufgrund des stark lokalisierten Schallfeldes die Korrektur der räumlichen Mittelung (vergleiche Abbildung 4.10 auf 68) und deren Unsicherheit groß. Hier zeigt sich ein weiterer prinzipieller Vorteil der Anregung hoher Frequenzen mittels der nichtlinearen Schallausbreitung im Falle der Impulsanregung im Vergleich zu der direkten Anregung der Frequenz durch den Ultraschallwandler.

6.1.3. Erstellen eines Referenzfits

Das Hydrophon wird für die Sekundärkalibrierung am TDS-Messplatz [57] verwendet. Bei dem TDS-Verfahren wird die unbekannte Empfindlichkeit des zu kalibrierenden Hydrophons mit der bekannten Empfindlichkeit eines Referenzhydrophons verglichen. Dazu muss die Empfindlichkeit des Referenzhydrophons an den durch das TDS-Verfahren festgelegte Frequenzpunkten bekannt sein. Entsprechend wurde ein neuer Referenzfit erzeugt, um anschließend die Kurve interpolieren zu können. Dazu wurde ein Least-Square-Fit mit einem kubischen Spline durchgeführt. Es wurden 9 Stützstellen verwendet. Die Ergebnisse des Fits sind in Form der Stützstellen der Spline in der Tabelle 6.2 angegeben.

Frequenz f / MHz	Übertragungsmaß $20 \log(M /M_0)$	Unsicherheit / % (k=2)
1,0	-150,2	17,7
5,0	-150,1	5,0
10,0	-149,8	5,2
20,0	-148,0	6,0
30,0	-144,8	6,3
40,0	-142,0	6,6
50,0	-144,4	8,2
60,0	-147,0	11,0
70,0	-147,7	19,3
80,0	-148,8	46,6
Frequenz f / MHz	Phase $\arg(M)$ / rad	Unsicherheit / rad (k=2)
1,0	0,26	0,16
5,0	0,10	0,03
10,0	0,23	0,04
20,0	0,45	0,05
30,0	0,47	0,08
40,0	0,03	0,10
50,0	-0,40	0,13
60,0	-0,46	0,17
70,0	-0,43	0,24
80,0	-0,61	0,49

Tabelle 6.1.: Ausgewählte Messwerte und Unsicherheitsbeiträge für die Impulskalibrierung des Hydrophons IP037. $M_0 = 1 \text{ V/Pa}$

Frequenz MHz	Wert V/Pa	Ableitung V/Pa/MHz
1	3,31E-8	-1,14E-9
10	3,27E-8	5,03E-10
20	3,99E-8	1,15E-9
30	5,85E-8	2,65E-9
40	7,94E-8	1,16E-10
50	6,07E-8	-2,47E-9
60	4,40E-8	-8,65E-10
70	4,08E-8	-3,00E-11
80	3,98E-8	-2,43E-10

Tabelle 6.2.: Werte für die Stützstellen des kubischen Splines für die Referenzkurve.

6.2. Hydrophon IP038

Das Hydrophon IP038 ist ebenfalls vom Hersteller *General Electric Company (Marconi Research Center), England*. Es besitzt eine 25 μm dicke Folie. Der nominelle Durchmesser des empfindlichen Elements beträgt 0,5 mm. Der effektive Radius wurde anhand von Richtcharakteristikmessungen ermittelt.

Das Hydrophon IP038 wird zusammen mit dem Sekundärstandard IP037 an dem TDS-Messplatz eingesetzt. Dort dient es der Validierung der Messung. Es wird bei jeder Servicemessung für den Frequenzbereich von 1 MHz bis 40 MHz zusammen mit dem Hydrophon IP037 eingesetzt. Dadurch ist das Verhältnis der Empfindlichkeiten der beiden Hydrophone bekannt. Dies war eine optimale Voraussetzung für die Verifikation der Vibrometermessung. So konnte das Hydrophon IP037 als Referenz für die TDS-Messung verwendet werden, wozu der Referenzfit aus Abschnitt 6.1.3 als Bezug dient. Das Hydrophon IP038 wurde einmal mit dem TDS-Verfahren sekundär kalibriert. Gleichzeitig wurde das Hydrophon auch primär mit dem Vibrometer kalibriert, um die Resultate zu vergleichen.

6.2.1. Kalibrierung des Hydrophons mit dem Vibrometer

Das Hydrophon wurde im Februar 2018 unter Verwendung des Vibrometers kalibriert. Die Korrektur für die räumliche Mittelung wurde anhand des gemessenen Schallfeldprofils und des effektiven (frequenzabhängigen) Hydrophonradius berechnet. In Abbildung 6.4 ist das Ergebnis der Messung unter Verwendung des Vibrometers dargestellt.

6.2.2. Vergleich zwischen IP038 relativ zu IP037 am TDS-Messplatz

In Abbildung 6.4 ist ebenfalls das Ergebnis der Kalibrierung mit dem TDS-Verfahren gezeigt. Als Referenz wurde das Hydrophon IP037 mit der in Abschnitt 6.1.3 bestimmten Referenzfit verwendet. Im Bereich von 6 MHz bis 60 MHz stimmen beide Kurven sehr gut überein. Im Frequenzbereich unter 6 MHz sind Abweichungen zu erkennen, die Werte stimmen aber innerhalb der Unsicherheit überein.

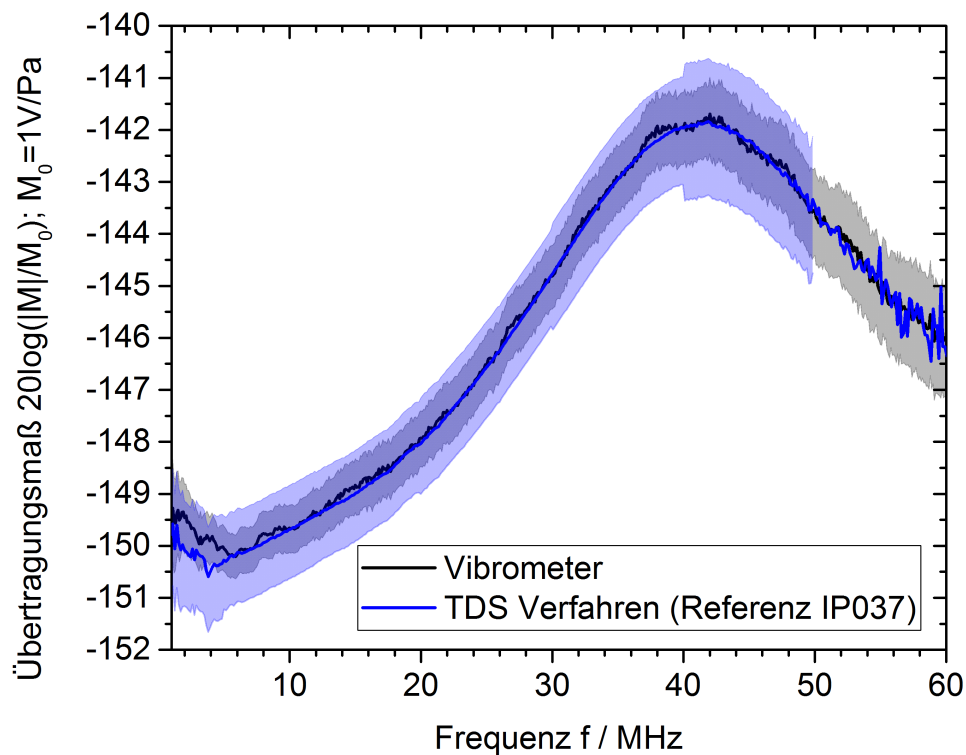


Abbildung 6.4.: Vergleich zwischen der direkten Kalibrierung des Hydrophons IP038 an dem Vibrometer und der Sekundärkalibrierung am TDS-Messplatz, wobei das Hydrophon IP037 als Referenz dient. Der farbig hinterlegte Bereich gibt das Unsicherheitsintervall für $k=2$ (99 %) an.

6.3. Hydrophon BB01

Das Hydrophon BB01 ist auf eine große Bandbreite mit einem flachen Frequenzgang optimiert. Es ist ein Prototyp einer Weiterentwicklung des in [58] beschriebenen Hydrophontyps. Es wurde in Kooperation zwischen der PTB und der Firma *Gampt mbH, Merseburg, Deutschland* gefertigt. Das Hydrophon besitzt eine $4,5\text{ }\mu\text{m}$ dicke PVDF Folie. Des Weiteren besitzt es ein zweischichtiges impedanzangepasstes Polyurethan-Backing. Der nominelle Durchmesser des Hydrophons beträgt $0,2\text{ mm}$. In Abbildung 6.5 ist eine Fotografie des Hydrophons gezeigt.

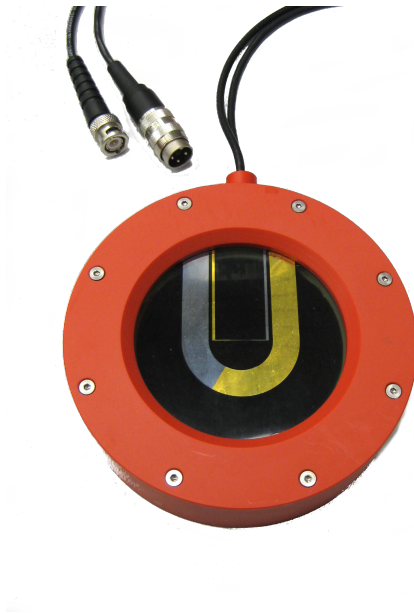


Abbildung 6.5.: Fotografie des breitbandigen Hydrophons BB01. Es handelt sich dabei um ein Membranhydrophon mit einem Polyurethan Backing.

Die Kalibrierung wurde mittels Impulsanregung und dem Vibrometer durchgeführt.

Der Amplitudengang ist in Abbildung 6.6 und der Phasengang in Abbildung 6.6 dargestellt. Im Gegensatz zu den vorher betrachteten Beispielen erkennt man bei diesem Hydrophon keine typische Resonanzüberhöhung im Frequenzgang. Es besitzt eine sehr flache Übertragungsfunktion mit einem leichten Abfall um etwa 2 dB bis 100 MHz .

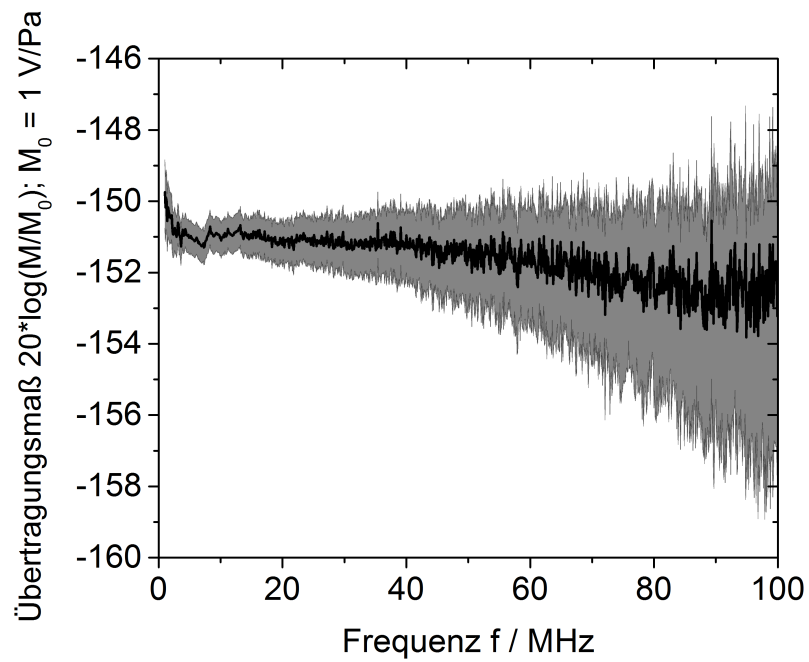


Abbildung 6.6.: Amplitudengang des Hydrophons BB01.

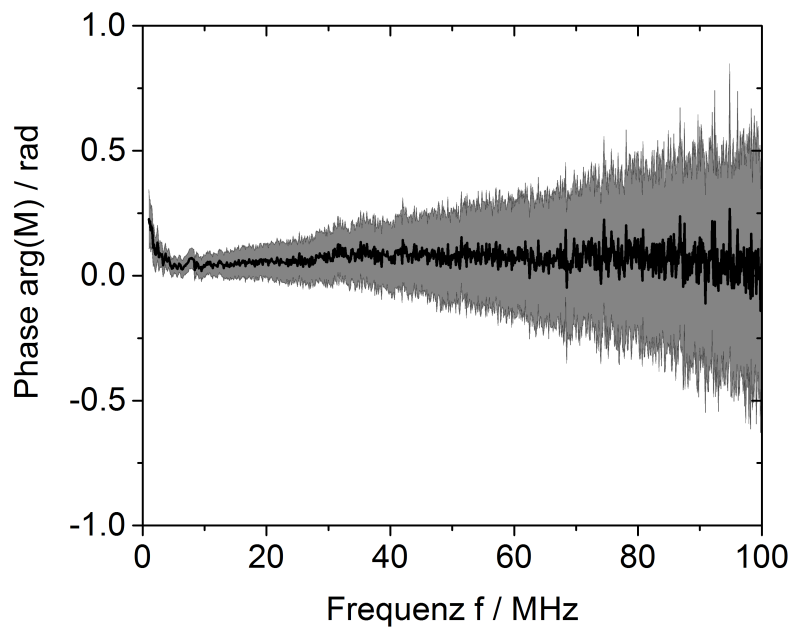


Abbildung 6.7.: Phasengang des Hydrophons BB01.

6.4. Hydrophon HITU-SI-03

Mit dem Vibrometer und der Impulsanregung ist es des Weiteren möglich, sogenannte HITU-Hydrophone direkt zu kalibrieren. HITU Hydrophone wurden an der PTB entwickelt [59] und werden für die Charakterisierung von hoch intensivem therapeutischen Ultraschall (HITU) eingesetzt. Diese Hydrophone besitzen eine Frontfläche bestehend aus einer Edelstahlfolie, die das Hydrophon vor Beschädigung hervorgerufen durch Kavitation¹ schützt (vergleiche Abbildung 6.8). Auf der Rückseite befindet sich ein Backing, das keine Kavitationsblasen entstehen lässt und gleichzeitig die Energie der Ultraschallwelle absorbiert, um Rückreflexionen zu verhindern. Bei dem hier verwendeten Hydrophon besteht das Backing aus Silikonöl.

Durch diese Schutzmaßnahmen und auch aus der Tatsache, dass mit dem Hydrophon hohe Schalldrücke gemessen werden, ergibt sich, dass die Hydrophonempfindlichkeit vergleichsweise gering ist. Dies erschwert die Kalibrierung mit Burstanregung. Mit Hilfe der Impulsanregung ist es aber möglich, auch diesen Hydrophontyp zuverlässig zu kalibrieren.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.9 und 6.10 dargestellt. Aufgrund der frequenzabhängigen Transmissionseigenschaften der Edelstahlfolie besitzt das Hydrophon eine grundsätzliche Tiefpasscharakteristik. Entsprechend nimmt die Empfindlichkeit mit zunehmender Frequenz ab. Außerdem ist eine leichte Resonanzüberhöhung durch eine Dickenschwingungsresonanz bei etwa 40 MHz zu erkennen.

¹Kavitation entsteht unter anderem in Ultraschallfeldern bei hohen Schalldrücken, wenn in der Unterdruckphase der Gesamtdruck in der Flüssigkeit unter den Dampfdruck fällt. Dabei reißt der Flüssigkeitsfilm auf und es entsteht eine Kavitationsblase. Kollabiert diese in der Nähe einer Oberfläche entstehen kurze Druckspitzen, die die Oberfläche mechanisch beanspruchen.

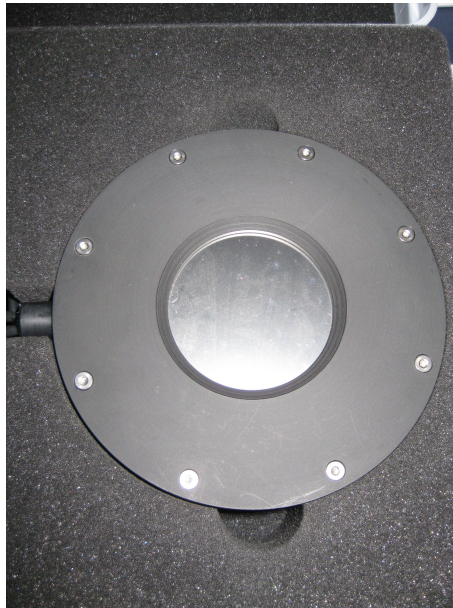


Abbildung 6.8.: Fotografie des Hydrophon HITU-SI-03. Die PVDF Folie mit dem Hydrophonelement ist durch eine Edelstahlfolie geschützt.

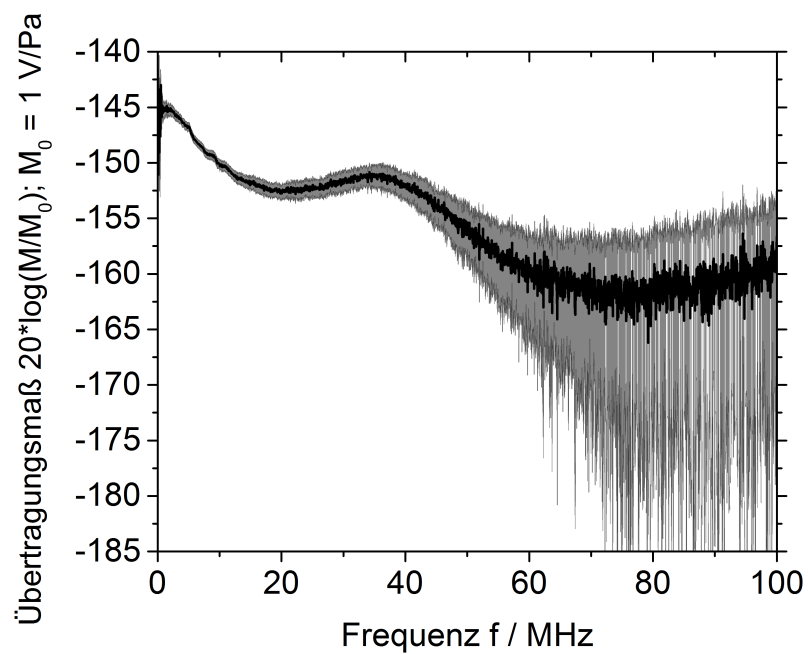


Abbildung 6.9.: Amplitudengang des Hydrophons HITU-SI-03.

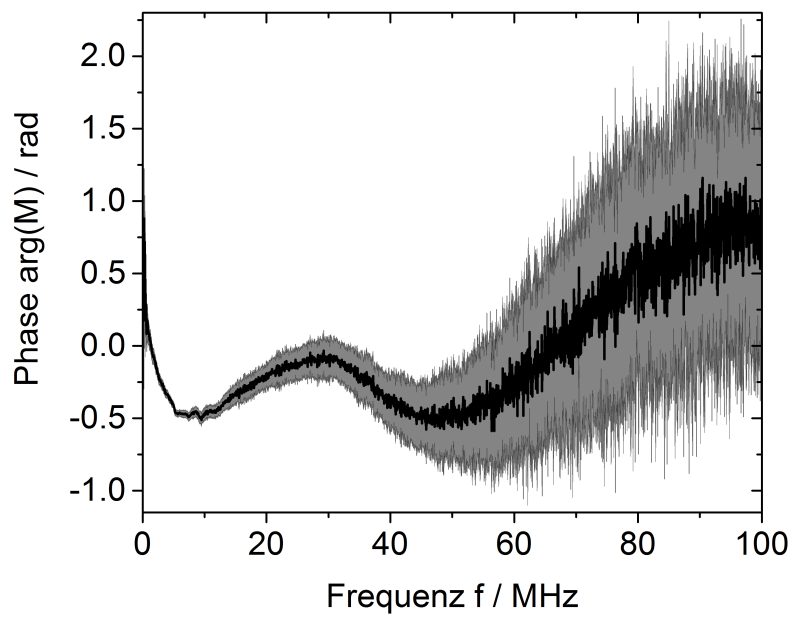


Abbildung 6.10.: Phasengang des Hydrophons HITU-SI-03.

7. Anwendung der Kalibrierdaten für die Impulsentfaltung

Hydrophone werden zunehmend zur Charakterisierung von zeitlich kurzen Signalen bei gleichzeitig hohen Schalldrücken im Bereich von 10 MPa bis 100 MPa eingesetzt. Solche Signale treten bei medizinischen Anwendungen von hoch intensiven Ultraschallfeldern auf, wie sie zur Nierensteinzertrümmerung oder zur thermischen Zerstörung von Krebsgewebe zum Einsatz kommen. An die Hydrophone werden daher besondere Anforderungen gestellt. Zum einen müssen sie äußerst robust sein, damit sie den hohen Schalldrücken widerstehen können. Gleichzeitig müssen sie auch bei Frequenzen bis 100 MHz Ultraschallsignale erfassen können, da aufgrund der Nichtlinearität des Wassers diese hohen Frequenzen während der Ausbreitung des Ultraschallsignals entstehen. Idealerweise sollte ein solches Hydrophon einen flachen Frequenzgang besitzen, damit die Ultraschallsignale unverfälscht wiedergegeben werden. In der Realität weicht der Frequenzgang, wie anhand des HITU-Hydrophons *HITU-SI-03* in Abbildung 6.4 zu sehen ist, deutlich von einem flachen Frequenzgang ab.

Wird das Spannungssignal mit der Hydrophonempfindlichkeit bei der Grundfrequenz skaliert, bleibt die Abweichung der Hydrophonempfindlichkeit bei hohen Frequenzen unberücksichtigt. Ein solches skaliertes Signal ist in Abbildung 7.1 gezeigt. In diesem konkreten Beispiel werden die hochfrequenten Signalanteile aufgrund der Tiefpasscharakteristik des Hydrophons unterschätzt, was sich an den abgeflachten Spitzen während der Überdruckphase zeigt. Bei der Bestimmung des maximalen Ultraschallüberdrucks führt dies zu einer systematischen Fehlbestimmung der Schallfeldkenngrößen.

Eine Möglichkeit die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern ist das Verfahren der Impulsentfaltung [60]. Bei der Impulsentfaltung wird das gemessene Spannungssignal $U(t)$, dargestellt als komplexwertiges Spektrum $U(f)$, durch den komplexwertigen Frequenzgang (die Kalibrierdaten) des Hydrophons $M(f)$ dividiert.

$$p(f) = \frac{U(f)}{M(f)} \quad (7.1)$$

Dadurch wird der Einfluss des Frequenzgangs des Hydrophons kompensiert. Nach der Rücktransformation in den Zeitbereich ergibt sich dann das korrigierte Drucksignal [37, 61, 62, 63]. Das in dieser Arbeit vorgestellte Kalibrierverfahren liefert für die Impulsentfaltung besonders geeignete Kalibrierdaten, da diese in Betrag und Phase, mit kleinem Frequenzinkrement und in einem weiten Frequenzbereich vorliegen. Die Anwendung der Kalibrierdaten für die Impulsentfaltung wurde in einem Konferenzbeitrag vorgestellt [64].

7.1. Messung eines HITU-Burst mit einem HITU-Hydrophon

Als Signal wurde ein Sinus-Burst mit 20 Perioden und einer akustischen Grundfrequenz von 1,06 MHz verwendet. Dieses Signal wurde von einem Funktionsgenerator *Tektronix, AFG 3251* erzeugt und über einen Leistungsverstärker *Amplifier Research, 500A250A* verstärkt. Die Peak-to-peak Spannung am Ultraschallwandler betrug 440 V. Ein HITU-Ultraschallwandler *Sonic Concepts Inc., model 101-128* sendete das Signal als Ultraschallwelle aus. Der Durchmesser des Wandlers betrug 64 mm und der Fokusabstand 63,2 mm. Das Hydrophon befand sich im Fokus des Ultraschallfeldes. Mit einem Oszilloskop *Tektronix, DPO 7104* wurde die Hydrophonspannung aufgezeichnet. Dabei wurden zur Mittelung 100 Wiederholungen durchgeführt.

Für die Entfaltung wurden die experimentell bestimmten Kalibrierdaten des Hydrophons verwendet. Diese wurden bereits in Abschnitt 6.4 vorgestellt. Die Signalentfaltung wurde, wie auch die weiteren Schritte der Berechnung, mit dem Programmpaket *PyDynamic* von Sascha Eichstädt [65, 66] und einem darauf aufbauenden *Pythonscript* durchgeführt.

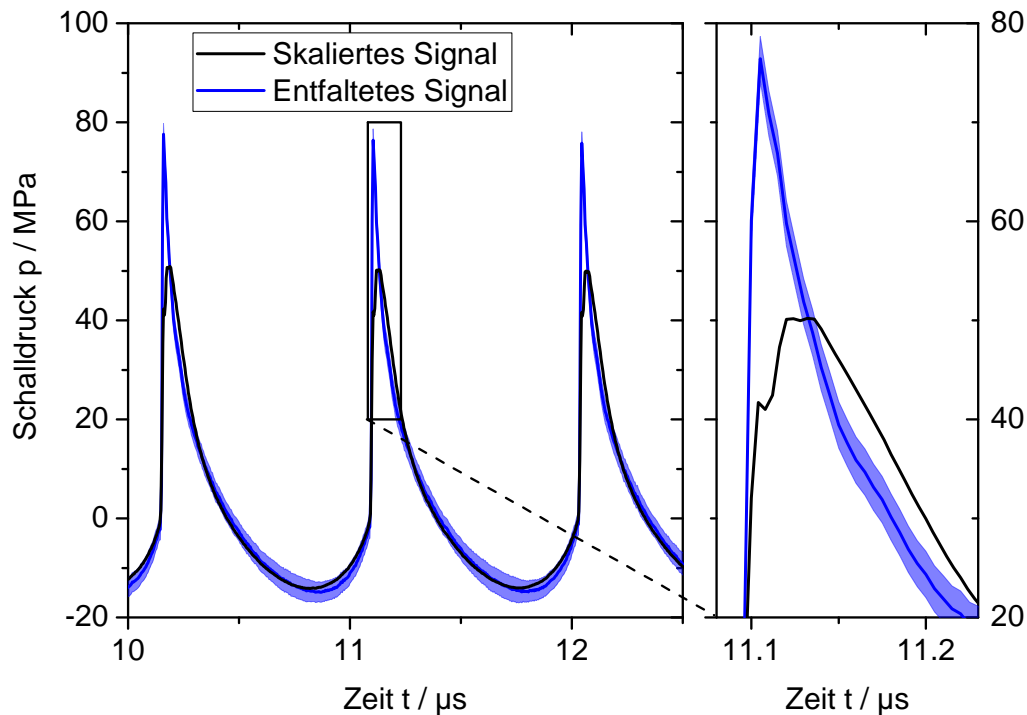


Abbildung 7.1.: Es ist ein Ausschnitt des HITU-Burst gezeigt. Zunächst wurde das Hydrophonsignal mit der Hydrophonempfindlichkeit bei der akustischen Grundfrequenz in den Schalldruck umgerechnet. Bei dem zweiten Signal wurde der Schalldruck durch Entfaltung unter Verwendung der Hydrophonempfindlichkeit bestimmt. Man erkennt, wie durch die Entfaltung die Spitzen des positiven Schalldruckes rekonstruiert wurden. Der blau unterlegte Bereich gibt den 95 % Vertrauensbereich an, der durch die Unsicherheitsbetrachtung abgeschätzt wurde. Der Ausschnitt einer Überdruckspitze ist vergrößert dargestellt, um den Unterschied zwischen dem skalierten Signal und dem entfalteten Signal deutlicher erkennen zu können.

7.2. Regularisierungsfiler

Bei der Entfaltung handelt es sich um ein schlecht konditioniertes inverses mathematisches Problem. Anschaulich lässt sich dies an Gleichung 7.1 zeigen. Wird für hohe Frequenzen die Hydrophonempfindlichkeit $M(f)$ klein, so wird das Signalrauschen der Hydrophonmessung in diesem Frequenzbereich verstärkt. Nach der Rücktransformation ist dann vermehrt Rauschen in dem Signal vorhanden, das im Extremfall das eigentliche Ultraschallsignal verdeckt. Um dies zu vermeiden, wird ein zusätzliches Tiefpassfilter auf das Hydrophonsignal angewendet, dessen Aufgabe es ist, bei hohen Frequenzen das Rauschen zu unterdrücken. Bei der Filterung muss beachtet werden, dass möglicherweise Frequenzanteile des Ultraschallsignals mitunterdrückt werden. Entsprechend ist es notwendig, dass für das Regularisierungsfiler eine Unsicherheitsabschätzung durchgeführt wird.

Als Regularisierungsfiler wurde hierbei ein Tiefpass erster Ordnung verwendet:

$$F_{LP}(f) = \frac{1}{1 + if/f_c} \quad (7.2)$$

Die Grenzfrequenz des Filters betrug $f_c = 150$ MHz.

Für die Unsicherheitsbetrachtung muss der durch den Tiefpass ungewollt herausgefilterte Anteil des Schalldrucks abgeschätzt werden. Dazu wurde das Drucksignal zunächst mit einem Wavelet-Ansatz [66] abgeschätzt. Als Ansatz wurde folgende Gleichung verwendet:

$$\Psi_i(f) = \frac{p_i f}{f_i} \exp\left(\frac{1}{2} - \frac{f^2}{2f_i^2}\right) \quad (7.3)$$

Für die Approximation des Schalldrucks wurde der gemessene Schalldruck bei der Grundfrequenz f_{awf} ($i = 1$) und bei den harmonischen Frequenzen ($i = 3, 8$) verwendet. Das approximierte Signal ergab sich damit in Form der Summe $\Psi_{tot}(f) = \sum_{i=1,3,8} \Psi_i(f)$. Das approximierte Signal $\Psi_{tot}(f)$ wurde mit einem Faktor A skaliert. Dabei wurde das Minimum des Faktors ermittelt, so dass das Integral über das approximierte Signal stets größer ist, als das Integral über den gemessenen Schalldruck.

$$A \int_0^{f_t} \Psi_{tot}(f) df \geq \int_0^{f_t} p(f) df \approx \sum_{f=0}^{f_t} p(f) \delta f; \forall f_t = [f_{awf}/2, f_{max}] \quad (7.4)$$

Die untere Frequenzgrenze $f_{awf}/2$ verhindert, dass niederfrequentes Rauschen dazu führt einen unplausibel großen Skalierungsfaktor zu erhalten. Die maximale Frequenz der Messung ist f_{max} . Mit diesem normierten Wavelet wurde dann der gefilterte Schalldruck abgeschätzt.

$$\Delta p = \int_0^\infty A \cdot \Psi_{tot}(f) |1 - F_{LP}(f)| df \quad (7.5)$$

Die Abschätzung ist dabei eine obere Schranke. Im Sinne der Unsicherheitsbetrachtung kann daher eine Rechteckverteilung angenommen werden. Die Standardabweichung berechnet sich entsprechend folgender Gleichung: $u_{reg} = \frac{\Delta p}{\sqrt{3}}$.

7.3. Unsicherheitsbetrachtung

Die Auswertung und Berechnung der Unsicherheit erfolgt in Python mit dem Programmpaket PyDynamic, das von Sascha Eichstädt [65, 66] entwickelt wurde. Mit diesem Softwaremodul lassen sich die Unsicherheiten (dargestellt als Kovarianzmatrizen) bei der Fouriertransformation zwischen Zeitbereich und Frequenzbereich transformieren. Das Programmpaket ermöglicht es weiterhin, die Unsicherheitspropagation bei der punktwweisen Multiplikation und Division von Datensätzen im Frequenzbereich durchzuführen. Der Vorgang wird, entsprechend den Eigenschaften der Fouriertransformation, als Faltung (Englisch *Convolution*) und Entfaltung (Englisch *Deconvolution*) bezeichnet. Die Berechnung des Regularisierungsfilters, wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, folgt der Literatur [66].

Für das, in Abbildung 7.1 gezeigte Signal, wurde damit ein Spitzenüberdruck $p_c = (75,7 \pm 1,1)$ MPa und ein Spitzenunterdruck von $p_r = (15,3 \pm 1,0)$ MPa bestimmt. Der durch das Regularisierungsfiler bedingte Unsicherheitsbeitrag wurde mit 0,5 MPa abgeschätzt.

Bei dem Ergebnis fällt auf, dass die absolute Unsicherheit für den Überdruck fast genauso groß ist, wie die Unsicherheit für den Unterdruck. Die relative Unsicherheit für den Spitzenüberdruck fällt damit viel kleiner aus. Intuitiv würde man erwarten, dass man bei dem wesentlich größeren Wert für den Überdruck auch eine größere Unsicherheit erhält. Der Grund dafür ist, dass bei der Berechnung die Annahme zugrunde gelegt wurde, dass die Unsicherheiten der Hydrophonkalibrierdaten über der Frequenz unkorreliert sind.

Der Wert für das Zeitsignal ergibt sich, vereinfacht ausgedrückt, als vektorielle Summe der einzelnen spektralen Komponenten. Für den Spitzenüberdruck ist das in guter Näherung die Summe aller Beträge. Die Unsicherheit bestimmt sich jedoch, da die Korrelationsfreiheit angenommen wurde, im Wesentlichen als geometrische Summe ($\sqrt{\sum x^2}$) der Einzelunsicherheiten der spektralen Komponenten, jeweils gewichtet mit einem Faktor, der vom Signalspektrum abhängt. In dieser Summe sind mehr als 1000 Beiträge der gleichen Größenordnung enthalten. Veränderungen einzelner Beiträge aufgrund der Gewichtungsfaktoren wirken sich daher kaum auf das Ergebnis aus, weshalb die Unsicherheit im zeitlichen Verlauf nur geringen Änderungen unterworfen ist. Würde man, als Gedankenexperiment, eine Korrelation von 1 zwischen allen Frequenzen annehmen, so würde die geometrische Summe ($\sqrt{\sum x^2}$) zu einer arithmetischen Summe ($\sum x$) werden. Die Unsicherheit wäre in diesem Fall generell wesentlich größer und jede Änderung eines Beitrages würde sich linear auf die Gesamtunsicherheit auswirken. Das heißt, der zeitliche Verlauf der Unsicherheiten würde stärker variieren und im Bereich großer Druckwerte wäre die Unsicherheit deutlich größer als in Bereichen kleiner Druckwerte.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Als Ziel der Arbeit wurde ein neuer Primärmessplatz realisiert. Als wesentliche Neuerung findet ein kommerzielles Hochfrequenzvibrometer Verwendung. Dadurch war es möglich die Messunsicherheit bei der Primärkalibrierung von Hydrophonen zu reduzieren. Der Frequenzbereich konnte durch die Verwendung eines Ultraschallimpulses als Anregungssignal von 1 MHz bis 100 MHz erweitert werden. Die Limitierung bei hohen Frequenzen ist dabei das Signal-Rausch-Verhältnis. Durch Verwenden einer Ultraschallquelle, die Signale bei höheren Frequenzen liefern kann, könnte die obere Frequenzgrenze noch weiter ausgedehnt werden.

Ein weiterer Vorteil der in dieser Arbeit angewendeten Impulsanregung ist, dass Amplitude und Phase über den gesamten Frequenzbereich ausgewertet werden können und so die komplexwertige Übertragungsfunktion des Hydrophons bestimmt wurde. Insgesamt ergibt sich daraus auch eine kürzere Zeit für die Messung und folglich eine höhere Stabilität der Ergebnisse. Der Messplatz wurde weitestgehend automatisiert, wodurch der Bediener entlastet wird und Bedienfehler vermieden werden.

Zukünftig lassen sich an dem Primärmessplatz auch Kundenaufträge bearbeiten, wodurch der Zwischenschritt über eine Sekundärkalibrierung entfällt. Dadurch können die verringerten Messunsicherheiten an die Anwender der Hydrophone weitergegeben werden. Auch soll das Messverfahren Eingang in die Hydrophonkalibriernorm finden.

Der vorherige Messplatz mit dem Interferometer wurde mit neuen Fotodioden ausgerüstet und die Quadraturdetektion wurde dabei realisiert. Dadurch kann an dem Interferometermessplatz auch die Impulsanregung verwendet werden. Der Vergleich zwischen Interferometermessplatz und Vibrometermessplatz ergab dabei eine gute Übereinstimmung der Messdaten. Jedoch ergeben sich bei dem Quadraturinterferometer aufgrund der umfangreichen Korrekturen bei der Auswertung und dem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis größere Unsicherheiten im Vergleich zu dem Vibrometer.

Als wichtige Anwendung, für die nun vorliegenden komplexwertige Hydrophonempfindlichkeiten, wurde das Verfahren der Impulsentfaltung betrachtet, mit dem aus dem verzerrten Hydrophonsignal das Ultraschallsignal rekonstruiert werden kann. Dieses Verfahren konnte auch erfolgreich für HITU Hydrophone eingesetzt werden, die eine geringere Empfindlichkeit und im Frequenzgang vergleichsweise große Schwankungen zeigen.

An dem Messplatz sind weitere Arbeiten geplant. Der Messplatz macht es möglich, die Hydrophone von Kunden direkt zu kalibrieren. Dazu müssen aber noch für die unterschiedlichen Bauformen der Kundenhydrophone entsprechende Halter oder Adapter gefertigt werden. Außerdem muss dazu die Dokumentation im Rahmen der Qualitätssicherung erfolgen und die zugehörigen Arbeitsanweisungen erstellt werden.

Ein weiterer Schritt wird zukünftig die Erstellung eines digitalen Kalibrierscheines sein. Auf diesem Gebiet wird zurzeit, besonders im Kontext der Digitalisierung und von Industrie 4.0, viel Entwicklungsarbeit geleistet. Sobald ein Standard für den digitalen Kalibrierschein [67] festgelegt wird, ist geplant die Auswertesoftware so anzupassen, dass die Daten, die sowieso in elektronischer Form vorliegen, direkt in den digitalen Kalibrierschein exportiert werden. Für den Anwender der Hydrophone ergäbe sich dann die Möglichkeit mithilfe der Daten seiner Hydrophonmessung, dem digitalen Kalibrierscheins und einer geeigneten Software, die im besten Falle von der PTB gratis zur Verfügung gestellt werden könnten, die Signalentfaltung seiner Messungen durchzuführen. Der Anwender wäre somit in der Lage mit seinem Hydrophon beliebige Signale zu analysieren und gleichzeitig zu seiner Messung die zugehörige Messunsicherheit zu bestimmen.

Literatur

- [1] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. *PTB Mitteilungen - Das Internationale Einheitensystem (SI)*. Hrsg. von Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2007 (siehe S. 2).
- [2] Rainer Scharf u. a. *PTB Mitteilungen - Experimente für das neue Internationale Einheitensystem (SI)*. Hrsg. von Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 2016 (siehe S. 2).
- [3] Srinath Rajagopal u. a. *Report on BIPM/CIPM Key Comparison CCAUV.U-K4: Absolute Calibration of Medical Hydrophones in the Frequency Range 0.5 MHz to 20 MHz*. Techn. Ber. National Physical Laboratory: Acoustics und Ionising Radiation Division, 2016 (siehe S. 3, 4).
- [4] David R. Bacon. »Primary calibration of ultrasonic hydrophones using optical interferometry«. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on* 35.2 (März 1988), S. 152–161 (siehe S. 3).
- [5] Triantafillos Koukoulas u. a. »Particle velocity measurements using heterodyne interferometry and Doppler shift demodulation for absolute calibration of hydrophones«. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics* 17.1, 070022 (2014), S. 070022 (siehe S. 3).
- [6] R. C. Preston u. a. »Primary calibration of membrane hydrophones in the frequency range 0.5 MHz to 60 MHz«. In: *Metrologia* 36 (1999), S. 331–343 (siehe S. 3).
- [7] Christian Koch und Walter Molkenstruck. »Primary calibration of hydrophones with extended frequency range 1 to 70 MHz using optical interferometry«. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 46.5 (Sep. 1999), S. 1303–1314 (siehe S. 3, 9, 69, 79).

- [8] Trevor J. Esward und Stephen P. Robinson. »Extending the frequency range of the National Physical Laboratory primary standard laser interferometer for hydrophone calibrations to 80 MHz«. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on* 46.3 (Mai 1999), S. 737–744 (siehe S. 4, 13, 33).
- [9] Youichi Matsuda, Masahiro Yoshioka und Takeyoshi Uchida. »Primary calibration of hydrophones up to 40 MHz in ultrasonic far-field using optical interferometry«. In: *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics* 34 (2013), S. 403–404 (siehe S. 4).
- [10] Youichi Matsuda, Masahiro Yoshioka und Takeyoshi Uchida. »Absolute Hydrophone Calibration to 40 MHz Using Ultrasonic Far-Field«. In: *MATERIALS TRANSACTIONS* 55.7 (2014), S. 1030–1033 (siehe S. 4).
- [11] Masahiro Yoshioka u. a. »Hydrophone Calibration System Using Laser Interferometry at NMIJ/AIST«. In: *18th, International congress on acoustics; ICA 2004*. Acoustical Society of Japan, Tokyo. 2004, S. I-667 –I-670 (siehe S. 4).
- [12] Ping Yang, Guangzhen Xing und Longbiao He. »Calibration of high-frequency hydrophone up to 40 MHz by heterodyne interferometer«. In: *Ultrasonics* 54.1 (2014), S. 402–407 (siehe S. 4, 13).
- [13] Oleg Vladimirovich Abramov. *High-Intensity Ultrasonics: theory and industrial Applications*. Gordon und Breach science publishers, Amsterdam, 1998 (siehe S. 7).
- [14] Heinrich Kuttruff. *Physik und Technik des Ultraschalls*. Hirzel, Stuttgart, 1988 (siehe S. 7, 8).
- [15] Klaus Brendel. »Kohlrausch«. In: Kap. Ultraschall (siehe S. 8).
- [16] Andrew Briggs. *Acoustic Microscopy*. Hrsg. von R. Brook u. a. Oxford University Press, Oxford, 1992 (siehe S. 8).
- [17] Ch. Koch, G. Ludwig und W. Molkenstruck. »Calibration of a fiber tip ultrasonic sensor up to 50 {MHz} and the application to shock wave measurement«. In: *Ultrasonics* 36.1–5 (1998). Ultrasonics International 1997, S. 721–725 (siehe S. 8, 9).
- [18] Anthony E. Siegman. *Lasers*. Hrsg. von Aidan Kelly. 20 Edgehill Road, Mill Vally, CA 94941: University Science Books, 1986 (siehe S. 9, 23).

- [19] Roy C. Preston. *Output Measurements for Medical Ultrasound*. Springer Science & Business Media, 2012 (siehe S. 10).
- [20] Rainer Reibold und Walter Molkenstruck. *Ultrasonic Exposimetry*. Hrsg. von Marvin C. Ziskin und Peter A. Lewin. CRC Press London, 1993 (siehe S. 13, 79).
- [21] Gerhard Heinzel, Albrecht Rüdiger und Roland Schilling. *Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new flat-top windows*. MPI für Gravitationsphysik/Laser Interferometry & Gravitational Wave Astronomy MPI für Gravitationsphysik/Teilinstitut Hannover. 2002. URL: <http://edoc.mpg.de/395068> (siehe S. 15, 17).
- [22] Ilja N. Bronstein u. a. *Taschenbuch der Mathematik*. 6. Aufl. Wissenschaftlicher Verlag Harry Deutsch GmbH, Frankfurt am Main, 2005 (siehe S. 16).
- [23] JCGM/WG 1. *Evaluation of measurement data - Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Extension to any number of output quantities*. Hrsg. von BIPM. JCGM, Okt. 2011 (siehe S. 16, 23).
- [24] Hans-Joachim Eichler u. a. *Lehrbuch der Experimentalphysik / Bergmann ; Schäfer*. Hrsg. von Dr.-Ing. Heinz Niedrig. 9. Aufl. Bd. 3 Optik. de Gruyter, Berlin, New York, 1993 (siehe S. 17).
- [25] Rainer Reibold und Walter Molkenstruck. »Laser interferometric measurement and computerized evaluation of ultrasonic displacements«. In: *Acta Acustica united with Acustica* 49.3 (1981), S. 205–211 (siehe S. 17, 79).
- [26] Ernst Prokott. *Modulation und Demodulation*. zweite Auflage. Elitera-Verlag, Berlin, 1975 (siehe S. 21).
- [27] Ulrich Tietze, Christoph Schenk und Eberhard Gamm. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. 13. Aufl. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010 (siehe S. 21).
- [28] Martin Bauer, Frank Ritter und Georg Siegmund. »High-precision laser vibrometers based on digital Doppler signal processing«. In: *Proc. SPIE*. Proc. SPIE 4827, Fifth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 50 (May 22, 2002); 4827 (2002), S. 50–61 (siehe S. 21).

- [29] Christian Rembe und Alexander Dräbenstedt. »Additional error sources for microscopic laser Doppler measurements«. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Bd. 5503. 2004, S. 446–457 (siehe S. 21, 23, 55).
- [30] Georg Siegmund. »Sources of measurement error in laser Doppler vibrometers and proposal for unified specifications«. In: *Proc. SPIE 7098, Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*. Bd. 7098. Proc. SPIE 7098, Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 70980Y (June 17, 2008). Georg Siegmund, Polytec GmbH, D-76337 Waldbronn, Germany. SPIE, 2008, 70980Y–70980Y–13 (siehe S. 21, 31).
- [31] Christian Rembe u. a. »Heterodyne laser-Doppler vibrometer with a slow-shear-mode Bragg cell for vibration measurements up to 1.2 GHz«. In: *8th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques*. Bd. 7098. Proc. of SPIE. 2008, 70980A–70980A–12 (siehe S. 21, 31).
- [32] Marcus Winter u. a. »The problem of calibrating Laser-Doppler Vibrometers at high frequencies«. In: *AIP Conference Proceedings* 1457.1 (2012), S. 165–175 (siehe S. 21, 31, 50, 52).
- [33] Christian Rembe und Alexander Dräbenstedt. »Laser-scanning confocal vibrometer microscope: Theory and experiments«. In: *Review of Scientific Instruments* 77 (2006), S. 083702 (siehe S. 23, 55).
- [34] JCGM/WG 1. *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Corrected Version 2010. JCGM, 2008 (siehe S. 23, 91).
- [35] B. D. Hall. »Evaluating the measurement uncertainty of complex quantities: a selective review«. In: *Metrologia* 53.1 (2016), S25 (siehe S. 24).
- [36] Martin Cooling, Victor Humphrey und Volker Wilkens. »Hydrophone area-averaging correction factors in nonlinearly generated ultrasonic beams«. In: *Journal of Physics: Conference Series* 279.1 (2011), S. 012002 (siehe S. 32).
- [37] Volker Wilkens und Christian Koch. »Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference hydrophone«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 115.6 (2004), S. 2892–2903 (siehe S. 33, 106).

-
- [38] IEC TC 87. *IEC 62127-2 Ultraschall - Hydrophone - Teil 2: Kalibrierung für Ultraschallfelder bis zu 40 MHz; Deutsche Fassung EN 62127-2:2007 + A1:2013*. Deutsch. DIN EN, Nov. 2013 (siehe S. 39, 63, 73).
- [39] Martin Weber und Volker Wilkens. »Erweiterung des Primärnormals für den Ultraschallwechseldruck und Verminderung der Kalibrierunsicherheiten«. In: *42. Jahrestagung für Akustik, Fortschritte der Akustik*. Hrsg. von Michael Vorländer und Janina Fels. Bd. 42. 2016, S. 438–441 (siehe S. 47, 133).
- [40] Martin Weber und Volker Wilkens. »Complex-Valued Frequency Response of Hydrophones: Primary Calibration and Uncertainty Evaluation«. In: *IUS2016 Tours*. IEEE. 2016 (siehe S. 47, 133).
- [41] Martin Weber und Volker Wilkens. »Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of ultrasonic hydrophones in amplitude and phase«. In: *Metrologia* 54.4 (2017), S. 432–444 (siehe S. 47, 52, 61, 133).
- [42] V. A. Belogol'skii u. a. »Pressure dependence of the sound velocity in distilled water«. English. In: *Measurement Techniques* 42.4 (1999), S. 406–413 (siehe S. 59).
- [43] M. Tanaka u. a. »Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports«. In: *Metrologia* 38 (2001), S. 301–309 (siehe S. 59).
- [44] William M. Haynes und David R. Lide, Hrsg. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 92nd. CRC Press London, 2011 (siehe S. 59).
- [45] Christopher B. Scruby und Leslie E. Drain, Hrsg. *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*. Taylor & Francis Group, 1990 (siehe S. 61, 79).
- [46] Klaus Weise und Wolfgang Wöger. *Meßunsicherheit und Meßdatenauswertung*. Wiley-VCH, Weinheim, 1999 (siehe S. 65).
- [47] Klaus Beissner. »Maximum Hydrophone Size in Ultrasonic Field Measurements«. In: *Acta Acustica united with Acustica* 59.1 (Nov. 1985), S. 61–66 (siehe S. 69).
- [48] Arnold Schoch. »Betrachtung über das Schallfeld einer Kolbenmembran«. In: *Akustische Zeitschrift* 6.6 (1941), S. 318–326 (siehe S. 69).
-

- [49] H. T. O’Neil. »Theory of focusing radiators«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 21 (1949), S. 516–526 (siehe S. 69).
- [50] Borna Maraghechi u. a. »Temperature dependence of acoustic harmonics generated by nonlinear ultrasound wave propagation in water at various frequencies«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.5 (2016), S. 2475–2481. eprint: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4946898> (siehe S. 71).
- [51] Robert T. Beyer. »Parameter of Nonlinearity in Fluids«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 32.6 (1960), S. 719–721. eprint: <http://dx.doi.org/10.1121/1.1908195> (siehe S. 71).
- [52] Wolfgang Menssen. »Ein faseroptisches Hydrophon auf der Basis eines Michelson-Interferometers für mittlere und große Druckamplituden«. Diss. Technische Universität Braunschweig, März 1996 (siehe S. 79).
- [53] Christian Koch, Walter Molkenstruck und Rainer Reibold. »Shock-wave measurement using a calibrated interferometric fiber-tip sensor«. In: *Ultrasound in Medicine & Biology* 23.8 (1997), S. 1259–1266 (siehe S. 79).
- [54] Euginia Putri Steder. *Praktikumsbericht*. 2017 (siehe S. 79, 133).
- [55] *Balanced Photoreceivers Models 1607-AC & 1617-AC*. Newport (siehe S. 82).
- [56] Peter L. M. Heydemann. »Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers«. In: *Appl. Opt.* 20.19 (Okt. 1981), S. 3382–3384 (siehe S. 82).
- [57] Christian Koch. »Amplitude and phase calibration of hydrophones by heterodyne and time-gated time-delay spectrometry«. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on* 50.3 (März 2003), S. 344–348 (siehe S. 90, 93, 94).
- [58] Volker Wilkens und Walter Molkenstruck. »Broadband PVDF Membrane Hydrophone for Comparisons of Hydrophone Calibration Methods up to 140 MHz«. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on* 54.9 (Sep. 2007), S. 1784–1791 (siehe S. 99).
- [59] Volker Wilkens, Sven Sonntag und Olga Georg. »Robust spot-poled membrane hydrophones for measurement of large amplitude pressure waveforms generated by high intensity therapeutic ultrasonic transducers«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.3 (2016), S. 1319–1332 (siehe S. 101).

-
- [60] Keith. A. Wear u. a. »Correction for frequency-dependent hydrophone response to nonlinear pressure waves using complex deconvolution and rarefactional filtering: application with fiber optic hydrophones«. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 62.1 (Jan. 2015), S. 152–164 (siehe S. 106).
- [61] Andrew Hurrell. »Voltage to pressure conversion: are you getting ‘phased’ by the problem?«. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1.1 (2004), S. 57 (siehe S. 106).
- [62] *Ultrasonics - Hydrophones - Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz (IEC 62127-1:2007 + Cor. :2008 + A1:2013)*. IEC (siehe S. 106).
- [63] Sascha Eichstädt u. a. »On challenges in the uncertainty evaluation for time-dependent measurements«. In: *Metrologia* 53.4 (2016), S125 (siehe S. 106).
- [64] Martin Weber und Volker Wilkens. »HIFU waveform measurement at clinical amplitude levels: primary hydrophone calibration, waveform deconvolution and uncertainty estimation«. In: *IUS 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium, Washington DC*. IEEE. 2017 (siehe S. 106, 133).
- [65] Sascha Eichstädt und Volker Wilkens. »GUM2DFT—a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain«. In: *Measurement Science and Technology* 27.5 (2016), S. 055001 (siehe S. 106, 109).
- [66] Sascha Eichstädt und Volker Wilkens. »Evaluation of uncertainty for regularized deconvolution: A case study in hydrophone measurements«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 141.6 (2017), S. 4155–4167. eprint: <http://dx.doi.org/10.1121/1.4983827> (siehe S. 106, 108, 109).
- [67] Siegfried Hackel u. a. »The Digital Calibration Certificate«. In: *PTB Mitteilungen*. Hrsg. von Jens Simon. Bd. 4. 2017, S. 75–81 (siehe S. 112).
- [68] Martin Weber und Volker Wilkens. »Towards an extension of primary hydrophone calibration using a laser vibrometer«. In: *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*. Hrsg. von Malcolm J. Crocker u. a. Juli 2015 (siehe S. 133).

A. Unsicherheitsabschätzung von radialen Verschiebungen des Hydrophons in rotationssymmetrischen Schallfeldern

Bei der Berechnung der räumlichen Mittelung wird von einem rotationssymmetrischen Schallfeld und einem dazu coaxialen rotationssymmetrischen Hydrophon ausgegangen. Das Schallfeld ist um den Punkt 0 lokalisiert. Für die Berechnung wird (wie in Abschnitt 4.7 auf Seite 63 dargelegt) die Integration über die Hydrophonfläche durch eine Integration entlang des Radius des polaren Koordinatensystems durchgeführt. Für die Unsicherheitsabschätzung muss aber auch der Fall betrachtet werden, dass das Hydrophon radial verschoben ist, und dadurch ein asymmetrisches Schallfeld empfängt. Die unsicherheitsbedingte Verschiebung ist in der Regel klein gegenüber dem Hydrophondurchmesser. Die Herleitung beruht auf elementarer Geometrie und der Integration in Polarkoordinaten, weshalb eine knappe Darstellung ausreichend ist. Wie in Abbildung A.1 dargestellt, liefert im Fall eines verschobenen Hydrophons der Schalldruck im blau markierten Bereich F_+ einen zusätzlichen Beitrag zu dem Signal, während der rote Bereich mit F_- keinen Beitrag mehr liefert. Die Änderung ergibt sich aus der Differenz beider Beiträge.

Um die Flächen in dem blauen, mondförmigen Bereich zu berechnen, wird zunächst die Länge des Kreisbogens b_1 in Abhängigkeit des Radius parametrisiert. Wie in Abbildung A.1 skizziert, wird zunächst der Winkel θ im Bogenmaß im Dreieck OAX durch den Kosinussatz bestimmt. r_{max} sei der maximale Radius des Kreises, r ist der Radius des Kreisbogens und a ist der Abstand zwischen

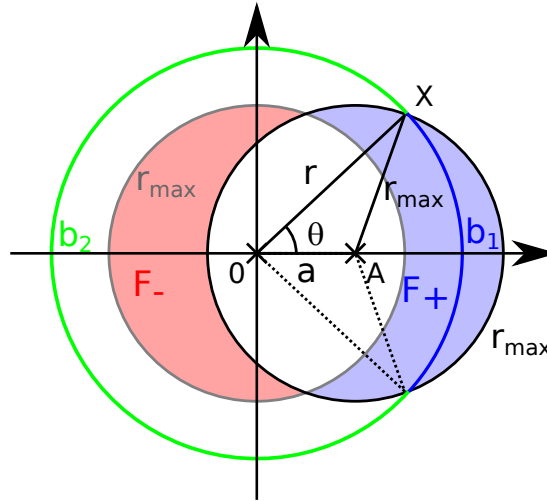


Abbildung A.1.: Skizze zur Erläuterung der Berechnung.

dem am Koordinatenursprung zentrierten Kreis und dem verschobenen Kreis. Der Mittelpunktswinkel des Kreisbogens b_1 beträgt aufgrund der Symmetrie 2θ . (Um eine Fallunterscheidung zu vermeiden, wird r auf $r_{\max} - a \leq r \leq r_{\max} + a$ beschränkt. Der Kosinussatz für das Dreieck $0AX$ lautet:

$$r_{\max}^2 = r^2 + a^2 - 2ar \cos(\theta) \quad (\text{A.1})$$

$$\theta(r) = \arccos\left(\frac{r^2 + a^2 - r_{\max}^2}{2ar}\right) \quad (\text{A.2})$$

Spitzenwinkel des Bogens ist damit $2\theta(r)$ und die Länge des Bogen $b_1 = 2\theta(r)r$. Das Integral in der blau markierten Fläche über ein radialsymmetrisches Feld $f(r)$ berechnet sich damit wie folgt:

$$F_+ = \int_{r_{\max}}^{r_{\max}+a} 2\theta(r)r f(r) dr \quad (\text{A.3})$$

Das Integral über die rote Fläche lässt sich analog berechnen. Dazu wird die Bogenlänge $b_2 = 2\pi r - b_1$ verwendet und die Integrationsgrenzen entsprechend angepasst:

$$F_- = \int_{r_{\max}-a}^{r_{\max}} (2\pi r - 2\theta(r)r) f(r) dr \quad (\text{A.4})$$

Bei Verschiebungen, die größer sind als der Hydrophondurchmesser, kann diese Herleitung weiterhin verwendet werden. Für die Berechnung ist es in diesem Fall einfacher, den verschobenen Vollkreis durch den Bogen b_1 zu parametrisieren und die Integration über die gesamte Kreisfläche durchzuführen.

B. Software zur Messdatenerfassung

Die Entwicklung der Software basiert auf dem Prinzip der objektorientierten Programmierung. Dies bedeutet unter anderem, dass die einzelnen Geräte einzelnen Objekten zugeordnet sind und über die Objekte die Kommunikation abgewickelt wird.

Die Software lässt sich in folgende Grundblöcke einteilen:

Die Objekte, welche die Kommunikation mit den mit dem Computer verbundenen Messgeräten realisieren, bilden den ersten Block. Dies geschieht über definierte Schnittstellen für den jeweiligen Gerätetyp. Jedes Gerät wird von einer eigenen Klasse abgebildet, welche die Schnittstelle des jeweiligen Gerätetyps implementiert und über welche die Kommunikation abgewickelt wird. Die für die Messung verwendeten Geräte lassen sich auswählen und werden in der Geräteliste hinterlegt.

Einen weiteren Block bilden die Objekte, welche die Ablaufsteuerung der Messung organisieren. Dabei wird der Ablauf realisiert, indem eine Liste von einzelnen Aufgaben nacheinander abgearbeitet wird. Es gibt dabei unterschiedliche Typen von Aufgaben. Allen Aufgaben gemein ist, dass sie auf die Geräteliste zugreifen und dadurch mit den Geräten kommunizieren. Insbesondere können dadurch Messaufgaben ausgelöst werden und die Ergebnisse abgefragt werden.

Die Resultate der einzelnen Schritte werden in der Aufgabenliste abgelegt. Diese Aufgabenliste wird nach jedem Schritt, zwecks der Datensicherheit im Falle eines Programmabsturzes, als XML-Datei abgespeichert. Die XML-Datei ist dabei eine Abbildung des aktuellen Programmablaufes und kann auch wieder in das Programm geladen werden. Sie enthält die Verknüpfungen zu allen während der Messung gesammelten Messdaten und wird für die spätere Auswertung benötigt.

Zusätzlich gibt es noch die Möglichkeiten, Informationen über die Messung zu hinterlegen. Informationen sind dabei z.B. der Zeitpunkt der Messung, welcher automatisch über die Systemzeit ermittelt wird, sowie Informationen über das untersuchte Objekt. In der Regel ist dies die Bezeichnung und Seriennummer des Hydrophons.

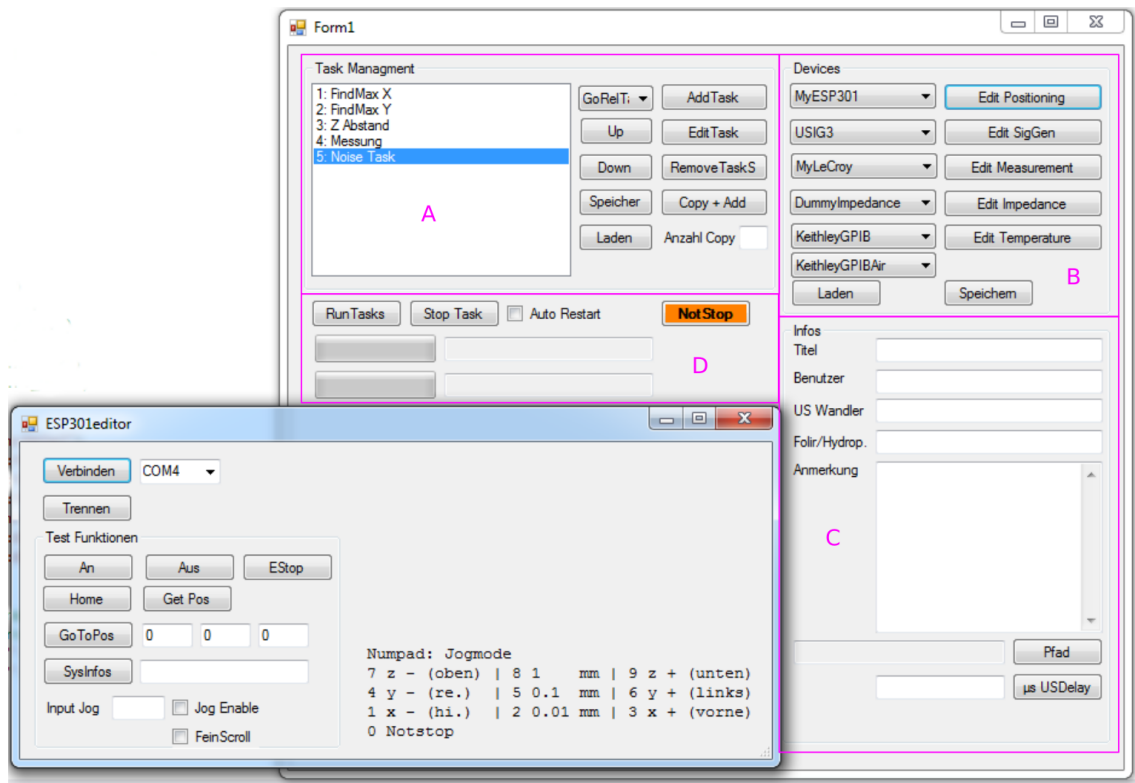


Abbildung B.1.: Benutzeroberfläche für das Programm zur Messdatenerfassung

B.1. Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist in Abbildung B.1 gezeigt. Sie gliedert sich in 4 Blöcke. Im Block (A) werden die einzelnen Messschritte (Tasks) festgelegt. Dabei kann über die Schaltflächen ein Element für eine Task ausgewählt werden. In dieser Liste sind verschiedene Tasks verfügbar, unter anderem Tasks zum Finden eines Maximums, Tasks für die Einstellung des Abstandes und Tasks, die Messungen an einer festen Position durchführen. Der ausgewählte Task wird an die Position nach dem markierten Eintrag in der Liste eingefügt. Der Task kann ferner bearbeitet werden, um die internen Variablen zu verändern, beispielsweise die Anzahl der Mittelungen oder die Anzahl und Abstände der Positionen bei der Suche des Schallfeldmaximums. Ferner können die Tasks in der Liste verschoben, gelöscht und kopiert werden. Die Liste kann außerdem in Form einer XML-Datei abgespeichert werden.

In Block B werden die für die Messung verwendeten Geräte ausgewählt und gerätespezifische Einstellungen vorgenommen. Für die Einstellungen öffnet sich ein eigenes Fenster. In der Abbildung ist dies beispielhaft für die Steuerung der

Schrittmotorachsen gezeigt. In dem Fenster kann die Schnittstelle ausgewählt und die Verbindung gestartet werden. Außerdem kann die Position der Achsen ausgelesen und auch neue Positionen zum Anfahren angegeben werden.

Für jedes Gerät lässt sich auch eine Dummy-Implementierung verwenden. Das ist ein Programmcode, der die Softwareschnittstelle für den Gerätetyp implementiert, aber lediglich Testdaten ausgibt. Dadurch lässt sich der Programmablauf ohne angeschlossenen Geräte ausführen sowie die Kommunikation mit einzelnen Geräten testen. Dies ist eine nützliche Funktion, wenn man neue Geräte implementieren möchte oder, wenn bei der Kommunikation mit einzelnen Geräten unerwartete Fehler auftreten.

Im Block C werden die organisatorischen Daten der Messung eingetragen, wie beispielsweise die Kennung des verwendeten Ultraschallwandlers und der verwendeten Folie. Hier kann auch der Speicherpfad für die Ergebnisse angegeben werden. Die Angabe der Verzögerung des Ultraschallsignals legt die Position des Messfensters fest.

In Block D wird die Messung gestartet und kann im Fehlerfall auch abgebrochen werden. Außerdem wird hier der Fortschritt der Messung angezeigt.

C. Software zur Messdatenauswertung

Die Software für die Auswertung der Daten wurde in der freien Software SciLab realisiert. Diese Software ist, vergleichbar mit Matlab, für die Datenauswertung und dem Verarbeiten von großen Matrizen geeignet. Die Auswertung der Messdaten erfolgt dabei bequem durch eine grafische Benutzeroberfläche, die in Abbildung C.1 gezeigt ist.

Über die Schaltfläche (1) kann eine XML-Datei einer Messung, die mit der unter Anhang B beschriebenen Software durchgeführt wurde, geladen werden. Dabei ist sowohl das Laden einer Messung, die mit dem Vibrometer durchgeführt wurde, als auch eine Messung eines Hydrophons möglich. Übliche Dateinamen sind „Autosave.xml“ und „Finish.xml“, wobei letztere erst nach dem Abschluss der Messung angelegt wird. Durch Laden der „Autosave.xml“ während einer laufenden Messung, kann der Fortschritt der Messung verfolgt werden. Durch Betätigen der Schaltfläche (2) kann die zuvor eingelesene Datei erneut eingelesen werden, was nützlich ist, um die Daten bei einer laufenden Messung zu aktualisieren.

In dem Feld (3) werden die Informationen zu der Messung zusammengefasst angezeigt. Dort ist das Datum der Messung, die von dem Nutzer eingegebenen Informationen sowie die automatisch ausgelesenen Typen und Seriennummern der verwendeten Geräte angegeben.

Die einzelnen Messschritte sind in der Liste (4) angezeigt. Durch Auswahl eines Eintrags werden im Fenster (5) weitere Informationen dazu angezeigt. Die in Fenster (6) vorhandenen Elemente erlauben die grafische Darstellung der Daten, wie sie in den Fenstern (7) und (8) exemplarisch gezeigt sind. Durch Verwenden der <STRG>-Taste lassen sich auch mehrere Einträge in der Liste (4) auswählen und anschließend grafisch darstellen. In der Liste (9) werden die einzelnen Messungen dargestellt. Bei Auswahl werden zu der einzelnen Messung weitere Informationen in (5) angezeigt. Mit den Schaltflächen in (10) lassen

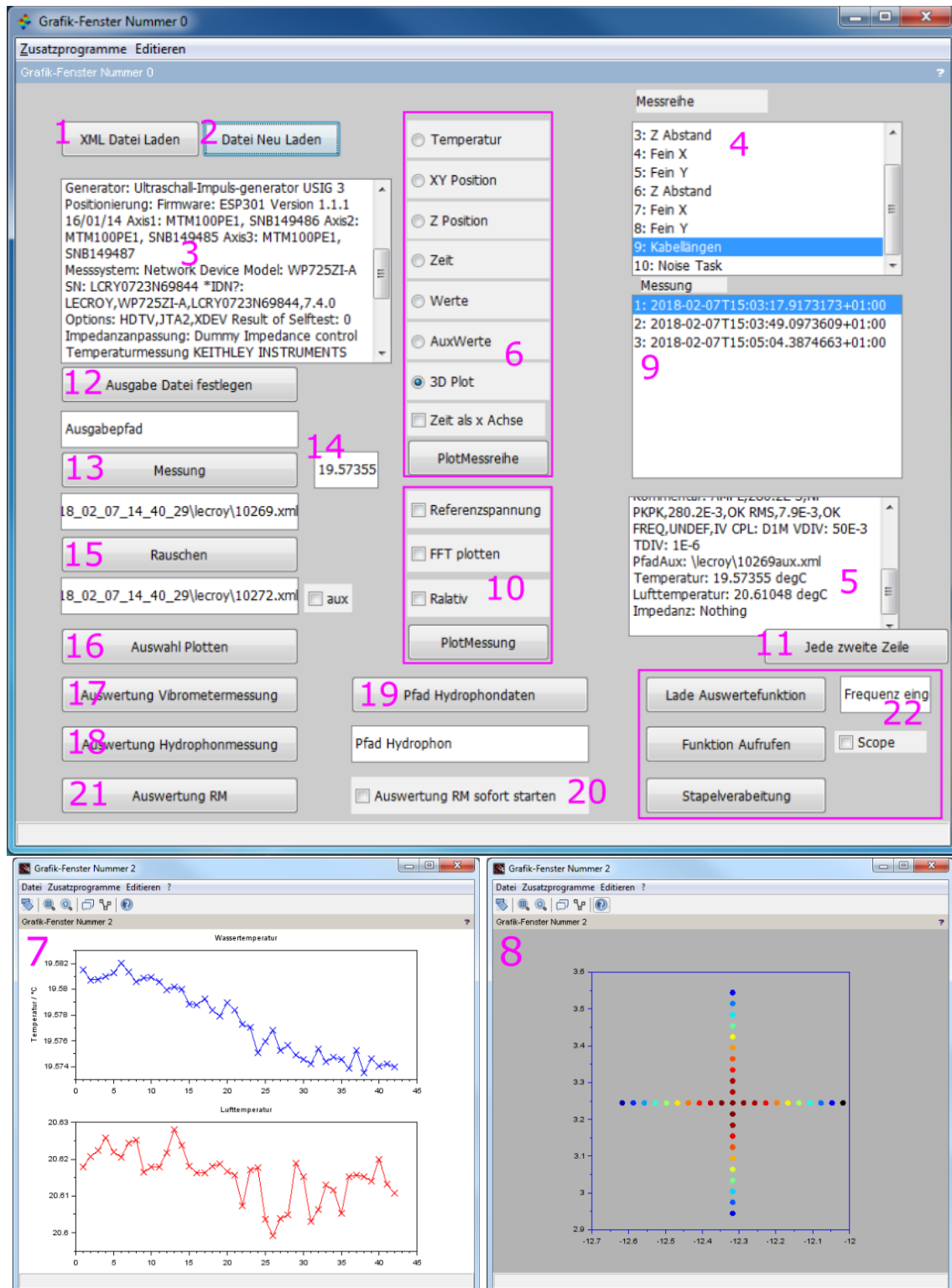


Abbildung C.1.: Abbildung der Benutzeroberfläche. Die Erklärung der Beschriftung mit dem Zahlen 1 bis 22 erfolgt im Text.

sich die Daten einer Messung grafisch darstellen. Es lassen sich auch mehrere Messungen gleichzeitig darstellen, wenn in (9) mehrere Messungen ausgewählt werden. Die Schaltfläche (11) entfernt die Auswahl jeder zweiten Zeile. Damit lässt sich die Anzahl der Datenreihen für eine übersichtlichere Darstellung in einem Fenster schnell reduzieren.

Für die Auswertung wird zunächst über die Schaltfläche (12) und dem sich öffnenden Dialog ein Dateiname festgelegt. Der gewählte Dateiname wird in dem Feld darunter angezeigt, wo er auch noch verändert werden kann. In der Liste (9) wird die Messung ausgewählt und anschließend durch Betätigen der Schaltfläche (13) übernommen, dabei wird in dem Feld (14) rechts daneben die Wassertemperatur angezeigt. Auf die gleiche Weise wird durch die Schaltfläche (15) die Rauschmessung ausgewählt. Mit der Schaltfläche (16) können die zuvor ausgewählten Datensätze dargestellt werden. Mit der Schaltfläche (17) wird die Auswertung für eine Messung mit dem Vibrometer gestartet und mit der Schaltfläche (18) die Auswertung für eine Hydrophonmessung. Die Ergebnisse werden in Form einer SOD-Datei abgespeichert. Dies ist ein Datenformat von SciLab, in welchem sich die Daten der Variablen automatisch speichern lassen. Sie können auch direkt wieder in SciLab eingeladen werden.

Um die räumliche Mittelung zu berechnen, wird in der Liste (4) eine Messreihe gewählt, bei der an unterschiedlichen Positionen gemessen wurde. Über die Schaltfläche (19) wird eine Datei für ein Hydrophon geladen. In dieser Datei sind die Durchmesser und weitere Daten für das Hydrophon gespeichert. Mit der Schaltfläche (20) wird festgelegt, ob die Berechnung sofort gestartet werden soll, oder ob eine Datei erstellt werden soll, mit der zu einem späteren Zeitpunkt die Berechnung durchgeführt werden soll. Die Schaltfläche (21) startet die Berechnung der räumlichen Mittelung. In (22) sind weitere Schaltflächen enthalten, die das Testen von Auswertefunktionen ermöglichen. Diese sind für die Auswertung aber nicht relevant.

D. Software zur Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit

Die abschließende Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit wird mit einem Programm durchgeführt, das mit SciLab entwickelt wurde. Auch hierbei kann auf eine grafische Benutzeroberfläche zurückgegriffen werden. Die Oberfläche ist in Abbildung D.1 gezeigt.

Über die Schaltfläche (1) können die für die Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit notwendigen Daten in Form einer SOD-Datei geladen werden. Die Daten für die Vibrometermessung, die Hydrophonmessung sowie die räumliche Mittelung wurden mit der Oberfläche aus Abschnitt C erstellt. In (2) werden die entsprechenden Dateipfade angezeigt und über die Schaltflächen (3) können die einzelnen Daten grafisch dargestellt werden. Über (4) lässt sich der Datensatz der räumlichen Mittelung interpolieren, um ihn auf die passende Punktzahl zu bringen. Über (5) lässt sich ein Datensatz für die Folienkorrektur berechnen. Dazu ist vorher eine Vibrometermessung zu laden, weil so die Frequenzskala der Vibrometermessung für die Berechnung verwendet wird. Es erscheint ein Dialogfeld (6), über das der Folientyp ausgewählt werden kann.

Optional sind für die Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit die räumliche Mittelung und die Lastkorrektur. Wird für diese keine Datei geladen, so werden diese Korrekturfaktoren auf 1 gesetzt. In Feld (7) wird die Startfrequenz und in Feld (8) die Endfrequenz jeweils in Hertz angegeben. Mit (9) wird die Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit gestartet. Nach Abschluss der Berechnung wird über ein Dialogfeld der Dateiname für das Abspeichern des Ergebnisses abgefragt.

Über die Schaltfläche (10) lassen sich mehrere der zuvor ausgewerteten Datensätze laden. Mit „Öffnen“ werden die ausgewählten Dateien zu der Auswertung hinzugefügt. Um den Ladevorgang zu beenden wird die Schaltfläche „Abbrechen“ im Dateidialog verwendet. Anschließend wird die Mittelung durchgeführt.

Für die Umwandlung der Ergebnisse in verschiedene Datenformate zur Weiterverarbeitung mit externen Programmen stehen Skripte zu Verfügung.

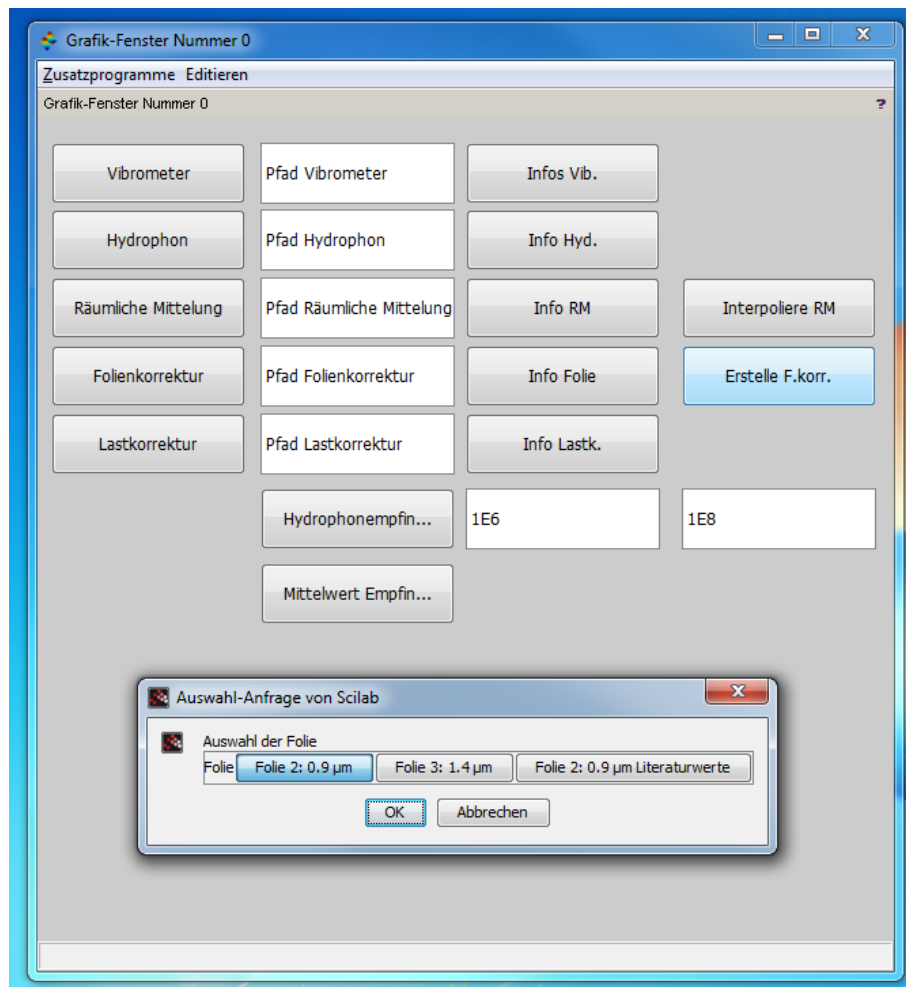


Abbildung D.1.: Benutzeroberfläche für die Berechnung der Hydrophonempfindlichkeit. Die Nummern sind im Text erklärt.

E. Veröffentlichungen

Betreute Studienarbeiten

- Euginia Putri Steder: Forschungspraktikum, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2017 [54]

Konferenzbeiträge

- ICSV 2015 mit mündlichem Vortrag und Konferenzbeitrag [68]
- DAGA 2016 mit mündlichem Vortrag und Konferenzbeitrag [39]
- IUS 2016 mit mündlichem Vortrag und Konferenzbeitrag [40]
- 296. PTB Seminar „9th International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements“ mit Posterbeitrag
- IUS 2017 mit Posterpräsentation [64]

Peer Reviewed Papers

- Martin Weber und Volker Wilkens. »Using a heterodyne vibrometer in combination with pulse excitation for primary calibration of ultrasonic hydrophones in amplitude and phase«, Metrologia, 2017 [41]